

REVISTA DE LA ACADEMIA COLOMBIANA de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

LA ACADEMIA ES ÓRGANO CONSULTIVO DEL GOBIERNO NACIONAL

VOLUMEN XXX

JUNIO DE 2006

NÚMERO 115

DIRECTOR DE LA REVISTA: SANTIAGO DÍAZ-PIEDRAHITA



CONTENIDO - CONTENTS

| | Pág. | | Pág. |
|--|------|---|------|
| Biología Molecular (Molecular Biology) | | - Alteración física de los fragmentos de matriz y de los vidrios volcánicos. | |
| - Caracterización molecular y genómica del proceso de integración de provirus del virus linfotrópico humano (HTLV) Tipo I [Molecular and genomic characterization of the process of HTVL -1 integration] | | [Physical alteration in matrix fragments and volcanic glasses] | |
| <i>Felipe García Vallejo</i> | 155 | <i>M.T. Flórez M., L.N. Parra S. & D. Malagón</i> | 243 |
| Botánica (Botany) | | Física (Physics) | |
| - Novedades taxonómicas y nomenclaturales en <i>Cremosperma</i> y <i>Resia</i> (Gesneriaceae) de Colombia. | | - Síntesis de polvos cerámicos de Cinc – Bismuto – Aluminio – Antimonio – Lantano y su uso en la fabricación de varistores. | |
| [Taxonomic and nomenclatural novelties for <i>Cremosperma</i> and <i>Resia</i> (Gesneriaceae) of Colombia] | | [Synthesis of ceramic powders of zinc – bismuth – aluminium – antimony – lanthanum and their use in making varistors] | |
| <i>José Luis Fernández-Alonso</i> | 171 | <i>J.J. Muñoz & J.E. Rodríguez-Páez</i> | 259 |
| - <i>Aristolochia grandiflora</i> Sw. (Aristolochiaceae): Desarrollo y morfología de la flor más larga del mundo. | | Química (Chemistry) | |
| [<i>Aristolochia grandiflora</i> Sw. (Aristolochiaceae): Development and morphology of the world's longest flower] | | - Análisis de la microporosidad de catalizadores de FCC [Microporosity analysis of FCC Catalysts] | |
| <i>María Angélica Bello, Hamleth Valois-Cuesta & Favio González</i> | 181 | <i>Yazmín Agómez P., Luis A. Oviedo A., Uriel Navarro U., Miguel Centeno & José Odriozola</i> | 271 |
| Ciencias de la Tierra (Earth Sciences) | | Zoología (Zoology) | |
| - Patrones de variabilidad de las temperaturas superficiales del mar en la Costa Caribe colombiana. | | - Descubrimiento de una nueva especie de <i>Atelopus</i> (Bufonidae) para Colombia: ¿Una luz de esperanza o el ocaso de los sapos arlequines? | |
| [Patterns of variation of sea surface temperatures along the Colombian Caribbean coast] | | [Discovery of a new species of <i>Atelopus</i> (Bufonidae) for Colombia: A hope or the eclipse of harlequin toads] | |
| <i>Gladys Bernal, Germán Poveda, Paola Roldán & Carlos Andrade</i> | 195 | <i>A. Acosta-Galvis, J. V. Rueda-Almonacid, Á. Velásquez, S. Sánchez P. & J. Peña- Prieto</i> | 279 |
| - Método híbrido de fronteras no reflectivas en límites de modelos sísmicos. | | - Aproximación al conocimiento de los anfibios en una localidad del Magdalena Medio (Departamento de Caldas, Colombia). | |
| [A hybrid method of non reflective borders for seismic models] | | [First report of the amphibian community for the middle Magdalena (Department of Caldas, Colombia)] | |
| <i>Alfredo Ghisays Ruiz, Carlos Alberto Vargas J., Luis Alfredo Montes Vides</i> | 209 | <i>Andrés Acosta Galvis, Carolina Huertas-Salgado & Marco Rada</i> | 291 |
| - Repelencia al agua en suelos: Una síntesis. | | Constitución de la Academia | |
| [A synthesis of water – repellent soils] | | [Members of the Academy] | 305 |
| <i>Daniel Francisco Jaramillo Jaramillo</i> | 215 | Publicaciones de la Academia | |
| - Aplicación de medidas repetidas a cuatro propiedades edáficas en los manglares del brazo Calancala, río Ranchería. | | [Publications of the Academy] | 307 |
| [Analysis of variance of repeated measurements of edaphic properties in mangrove vegetation] | | | |
| <i>Mauricio A. Ruiz-Ochoa, Rafael Meléndez, Martha L. Castellanos & Jaime H. Polanía</i> | 233 | | |

CARACTERIZACIÓN MOLECULAR Y GENÓMICA DEL PROCESO DE INTEGRACIÓN DE PROVIRUS DEL VIRUS LINFOTRÓPICO HUMANO (HTLV) TIPO I

por

Felipe García Vallejo*

Resumen

García Vallejo, F.: Caracterización molecular y genómica del proceso de integración de provirus del virus linfotrópico humano (HTLV) tipo I. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **30** (115): 155-170. 2006. ISSN 0370-3908.

Se estudió del proceso de integración del HTLV-I desde varios enfoques conceptuales y metodológicos incluyendo estudios filogenéticos de la integrasa, sus características estructurales y la genómica estructural de la integración de provirus en células linfocitarias de individuos seropositivos. Estructuralmente se observó que los residuos HHCC en la región N-terminal y DDE en el centro catalítico de la enzima, estaban conservados en las integrasas del HTLV-I/II, del VIH-1 y del ASV. El grado de expansión clonal de linfocitos infectados en individuos seropositivos con Paraparesia espástica tropical, leucemia de células T del adulto y portadores asintomáticos fue variable. El número de amplicones de IPCR fue significativamente mayor en pacientes PET/HAM (8.6 ± 2.5) que en portadores asintomáticos (5.0 ± 1.7) o en pacientes ATL (2.8 ± 3.0) ($P < 0.004$). Las secuencias del genoma humano de 50 nucleótidos que flanquean el 3'LTR presentaron grados de homología variable con cDNA provenientes de varias líneas celulares tumorales y de tejidos normales. Un alineamiento de tales secuencias permitió localizar cromosómicamente los diferentes provirus dentro del genoma humano. Los sitios de integración del HTLV-I en los individuos infectados estuvieron distribuidos de una manera no aleatoria preferencialmente en secuencias ricas en GC. En los cromosomas 8, 9 y 16 se encontró una mayor cantidad de secuencias provirales. La hibridización sustractiva de fragmentos de DNA humano generados por AFLP permitió una de dactilarización del fenómeno de integración dentro del genoma humano infectado, metodología que además es susceptible de ser utilizada en otros contextos moleculares.

Palabras clave: Genómica estructural, integración proviral, HTLV-I, PET/HAM.

* Profesor Titular. Departamento de Ciencias Fisiológicas. Facultad de Salud. Universidad del Valle. Director Científico del Laboratorio de Biología Molecular y Patogénesis, Director de Colciencias.

Abstract

The process of HTLV-I integration was analyzed under different approaches. Those included the phylogenetic analyses of the integrase, their structural characteristics and the structural genomics of the proviruses in lymphocytic cells of infected patients. Structurally it was observed that the HHCC amino acid residues at the N terminus and DDE in the catalytic core were consensus in the integrases of HTLV-I, ASV and HIV-1 viruses. The level of clonal expansion in infected lymphocytes of healthy carriers, TSP/HAM and ATL patients was variable. The number of IPCR amplicons was significant higher in TSP/HAM patients (8.6 ± 2.5) than in healthy carriers (5.0 ± 1.7) or ATL patients (2.8 ± 3.0) ($P < 0.004$). The human genome sequences of 50 bp that flank the 3'-LTR of HTLV-I provirus had variable level of homology with cDNA of tumor cell lines and normal tissues. Alignments of such sequences possibilitated the chromosomal location several proviruses. In general the integration sites in HTLV-I seropositive individuals were non randomly distributed in G:C rich domains of human genome. In chromosomes 8, 9 and 16 were recorded more integrated sequences. The substrative hybridization of AFLP fragments permitted the fingerprinting of integration process in the human genome. This methodology would be used in other molecular systems.

Key words: Genomics, Proviruses, HTLV-1.

Introducción

El virus linfotrópico humano tipo I (HTLV-I), fue el primer retrovirus humano descubierto (Poiesz *et al.*, 1980; Yoshida *et al.*, 1982; Hinuma *et al.*, 1982). Junto con el virus de la leucemia de células T del simio (STLV) y el HTLV-II, se ha incluido recientemente en el grupo de los virus linfotrópicos de primates (PTLV). Aunque los miembros del grupo PTLV son virus oncogénicos y pertenecen a la subfamilia Oncovirinae, no contienen oncogenes derivados de secuencias celulares siendo su replicación regulada por los genes *rex* y *tax*. Lo que los define como oncovirus es el producto proteico del gen *tax* (p40), el cual es una oncoproteína (Seiki *et al.*, 1983).

El virión del HTLV-I, es partícula envuelta de 110-140 nm de diámetro, se ha clasificado por su morfología como retrovirus tipo C de mamíferos. La envoltura del mismo contiene espigas compuestas por las proteínas de envoltura gp21 y gp46 y en su nucleocápside se encuentran la transcriptasa reversa y la proteasa íntimamente asociadas con el RNA genómico del virus y encerradas en las proteínas de la nucleocápside p15, p24 y p19. El genoma viral es un dímero de RNA⁺ al cual se le liga una molécula de RNA de transferencia (tRNA_{pro}), que sirve como cebador en el proceso de síntesis de DNA dirigido por la transcriptasa reversa (Tangy, 1996).

El cDNA del provirus es de aproximadamente 9032 nucleótidos y en general su estructura es un típico arreglo de genes 5'-gag-pol-env-3'. En su orden, la región Gag codifica para las proteínas de la nucleocápside p15, p19 y p24. La región Pol codifica para las enzimas Proteasa (Pr), Integrasa (In) y Transcriptasa reversa (RT). La región

Env codifica para las glicoproteínas de envoltura viral gp46 y gp21. La región pX que se localiza en el extremo 3' codifica para varias proteínas, entre las cuales se incluyen las proteínas reguladoras Tax y Rex sintetizadas a partir de un mismo mRNA policistrónico mediante splicing alternativo (Tangy, 1996; Coffin, 1992). La proteína Tax, cuya masa molecular es de 42 kDa, es un transactivador de la transcripción de los genes virales y de algunos genes celulares; la proteína Rex de 27 kDa actúa como un regulador post-transcripcional. A los dos extremos del cDNA proviral existen dos repeticiones terminales largas (LTRs) que contienen tanto el promotor para la expresión de los diferentes mRNA virales como otros elementos reguladores.

La infección por el HTLV-I ha sido implicada en la patogénesis de una gran variedad de enfermedades (Watanabe 1997; Uchiyama 1997) que se pueden agrupar en 3 diferentes categorías: Enfermedades que se han establecido como entidades clínicas causadas por HTLV-I, tales como leucemia de células T del adulto (Uchiyama *et al.*, 1977; Yoshima *et al.*, 1984), paraparesia espástica tropical/mielopatía asociada a HTLV-I (Gessain *et al.*, 1985; Osame *et al.*, 1986), y uveítis HTLV-I (Mochizuki *et al.*, 1992); las tres asociaciones tienen un fuerte soporte epidemiológico y características clínicas únicas que las distinguen de otras similares. Aquellas que están asociadas a la infección por HTLV-I pero que no se ha aceptado su papel causal, entre éstas se encuentran la dermatitis infecciosa (La Grenade *et al.*, 1990), síndrome de Sjögren (Terada *et al.*, 1994), artritis (Nishioka *et al.*, 1989) y miositis (Leon-Monzon *et al.*, 1994), estas enfermedades no poseen soporte epidemiológico ni características clíni-

cas únicas, y un grupo de enfermedades que crece en número, sobre las cuales se ha sugerido la posible asociación con la infección debido a la seropositividad de los pacientes para HTLV-I, tampoco tienen soporte epidemiológico ni características clínicas únicas. Entre ellas podemos enumerar la polimiositis, neumopatía (**Kimura et al.**, 1996), linfadenitis (**Ohshima et al.**, 1992) y linfoma de células T cutáneo (**Shimoyama**, 1991), entre otras.

El HTLV-I se encuentra ampliamente distribuido por todo el mundo (**Blattner et al.**, 1985; **Zaninovic**, 1981 (a); **Zaninovic et al.**, 1986 (b); **Slattery Francini & Gessain** 1999. Evolution patterns of global dissemination and interspecies transmission of human and simian T cell leukemia viruses. *Genome Res.* 9: 525-540), siendo endémico en diferentes regiones geográficas entre las que se incluyen Sudamérica, el sur del Japón, la región del Caribe, Melanesia, Australia y África occidental (**Blattner et al.**, 1985). La infección por HTLV-I también se presenta en regiones no tropicales del planeta incluyendo Norteamérica, Centroamérica y algunos países de Europa, especialmente en poblaciones de drogadictos intravenosos y donantes de sangre. Se calcula que en el mundo hay alrededor de 20 millones de personas infectadas (**Mueller**, 1991). En Latinoamérica con una población de 360 millones de habitantes, la cifra es de aproximadamente 7 millones, entre 1% y 2% como tasa de infección (**Coffin**, 1992). En Colombia, el municipio de Tumaco en el Sur del Pacífico, es una zona endémica para el HTLV-I caracterizada por una alta tasa de incremento anual de PET/HAM (**Trujillo et al.**, 1992; **García-Vallejo et al.**, 1982). El HTLV-I infecta entre el 0.2 y el 10% de la población mestiza, negra e indígena de esta región, mientras las tasas de seropositividad entre los donantes de los bancos de sangre de la costa pacífica oscilan entre 0.2 y 0.8% (**Ijichi et al.**, 1993; **Cortés & García**, 1996). En la costa atlántica colombiana se ha descubierto recientemente un foco endémico municipio de Moñitos del departamento de Córdoba (**Quintana et al.**, 2004). También se conocen casos aislados en las regiones del Caribe (**Chávez et al.**, 2004; **Dangond et al.**, 1995), el Urabá antioqueño y la población de indígenas Wayú en la Guajira (**Ijichi et al.**, 1993). Varios trabajos revelan la existencia de mutaciones geográficamente restringidas en Tumaco, que no se habían reportado previamente en el Caribe, África y Japón (**García-Vallejo et al.**, 1995; **Renjifo et al.**, 1995; **Renjifo et al.**, 1996; **García-Vallejo**, 1996; **García-Vallejo et al.**, 2000; **Domínguez et al.**, 2002; **García-Vallejo & Zaninovic**, 2002; **Balcázar et al.**, 2003).

La integración del cDNA retroviral en el genoma del hospedero constituye una etapa crucial de su ciclo de vida

puesto que está directamente implicada en la expresión eficiente de su progenie (**Goff**, 1990; **Goff**, 1992; **Katzman & Skalka**, 1999). Este proceso, ha sido estudiado en varios sistemas de retrovirus, que incluyen el virus de la leucemia murina de Moloney (M-MuLV), el virus de la necrosis esplénica (SNV), los virus del sarcoma y leucosis aviar (ASLV) y el de la inmunodeficiencia humana (HIV-I); a partir de estos estudios se ha podido proponer un mecanismo general del evento de integración (**Sandmeyer et al.**, 1990). La mayoría de las regiones del genoma humano parecen ser accesibles a la integración retroviral y la frecuencia de uso de los potenciales sitios varía de manera considerable. Las primeras evidencias sugirieron que el proceso de integración de retrovirus era un proceso aleatorio (**Sandmeyer et al.**, 1990); sin embargo, nuevas evidencias dan soporte a una hipótesis sobre la existencia de "sitios calientes" para el proceso de integración (**Leclercq et al.**, 2000; **Cabrera & García-Vallejo**, 2000)

Lo que se conoce sobre la estructura de la integrasa de los retrovirus proviene de los estudios realizados sobre el virus de la inmunodeficiencia humana tipo I (VIH-I) cuya integrasa consta de tres dominios (**Andrake & Skalka**, 1996). El dominio N-terminal que comprende una extensión de aminoácidos del 1 al 49, presenta residuos conservados en la secuencia HH...CC que permiten la formación de una estructura de dedo de zinc, estructura que le confiere propiedades de unión al DNA. El dominio central catalítico, que se localiza de los aminoácidos 50 al 219 contiene las secuencias canónicas DD35E y el dominio C terminal (aminoácidos 220-300) presenta una región menos conservada con propiedades de unión al DNA de forma inespecífica. Hasta el momento no se ha descrito la estructura de la integrasa del HTLV-I.

Materiales y métodos

La muestra

Durante más de cinco años se recolectaron, en diferentes zonas del país, muestras de individuos seropositivos para el HTLV-I. Todos los individuos que hicieron parte del estudio fueron informados de los objetivos del mismo y consintieron donar muestras de sangre periférica. Todas las muestras fueron caracterizadas como infectadas por el HTLV-I mediante la prueba de ELISA siendo confirmados por western blot específico para HTLV-I y además de un PCR con oligonucleótidos específicos para la región LTR, y el gene Tax. Tanto las muestras de plasma como las de linfocitos de sangre periférica se almacenaron en condiciones apropiadas para conservar su óptima estabilidad biológica.

Extracción del DNA de linfocitos de pacientes seropositivos para HTLV-I

La obtención de las células mononucleares de sangre periférica (PBMC) a partir de las cuales se obtuvo el DNA objeto de estudio, se realizó a partir de 5 ml de sangre total de todos los individuos naturalmente infectados mediante la técnica de Ficoll-Hypaque (Sambrook *et al.*, 1989). Una vez obtenidas las PBMC se lavaron dos veces con PBS y se sometieron a lisis con SDS/Proteinasa K a 56°C. El DNA fue extraído con fenol y precipitado con etanol al 100% y lavado dos veces en etanol al 70%. Al final de la extracción el DNA obtenido se resuspendió en 10mmol/L de Tris-HCl pH 8.0, 1mmol/L de EDTA que contenía 200 mg/ml de RNasa A. La concentración y el grado de pureza se determinaron mediante métodos espectrofotométricos. En todos los casos, se tomaron las precauciones necesarias para evitar la contaminación en el área donde se realizó la extracción del DNA.

Amplificación del DNA de las regiones LTR y Tax

Para la obtención de los segmentos amplificados de las regiones LTR y del gen *tax* de los aislados que hicieron parte del presente trabajo se procedió según las condiciones descritas en trabajos previos (Balcázar *et al.*, 2003; Domínguez *et al.*, 2002; Furukawa *et al.*, 2000). Brevemente, los cebadores utilizados para la primera ronda de amplificación de la región Tax fueron PXO1⁺, 5'-TCGAAACAGCCCTG CAGATA-3' (7257-7276) y PXO2⁻, 5'-TGAGC TTATA GATTTGTCTTCA-3' (8447-8467). Después de 35 ciclos de PCR se amplificó 1 ml de los productos de esta primera ronda utilizando los cebadores internos PXI1⁺, 5'-ATACAAAG TTAACCATGCTT-3' (7274-7293) y PXI3⁻, 5'-AGACG TC AGAGCCTTAGTCT-3' (8374-8393). Las condiciones de amplificación fueron las mismas en ambas rondas y consistieron en una etapa de desnaturalización a 94°C durante 60 segundos, hibridación de los cebadores a 58°C durante 75 segundos y extensión a 72°C durante 90 segundos, con un periodo de extensión de final de ciclo de 10 minutos a 72°C. Para amplificar la región LTR se utilizaron los cebadores externos LTRO1⁺, 5'-ACCATGAGCCCCAAATATCCCC-3' (9-31) Y LTRO2⁻, 5'-TCGTATCCCGGACGAGCC CCAA-3' (757-746) en una primera ronda de PCR y en la segunda ronda se utilizaron los cebadores internos LTRI1⁺, 5'-AGACTAA GGCTCT GACGTCTCCC-3' (97-119) y LTRI2⁻, 5'-AATTTCTCTCC TGAGAGTGCT-3' (722-746). Las condiciones de amplificación fueron similares a las de amplificación de la región Tax.

Amplificación del DNA genómico flanqueante al provirus HTLV-I por PCR inverso (IPCR)

Para llevar a cabo la amplificación enzimática mediante la técnica de PCR inverso (IPCR) se utilizó un protocolo desarrollado en Japón (Takemoto *et al.*, 1994), el cual fue adaptado para nuestras condiciones específicas. El proceso completo incluye 4 etapas a saber (figura 1): Una etapa inicial de digestión del DNA genómico infectado con la endonucleasa de restricción Alu I, que es una enzima de corte frecuente y reconoce una secuencia palindrómica de 4 pares de bases. El proceso continúa con una segunda etapa de autoligación de los fragmentos obtenidos en la etapa anterior mediante el uso de la enzima ligasa del DNA procedente del fago T4. En este punto se tuvo un especial cuidado de ajustar una concentración de DNA inferior a 50 ng/ml para evitar que se favorezca el proceso de ligación entre fragmentos diferentes y no la auto ligación que se buscaba. Una tercera etapa consistió en la

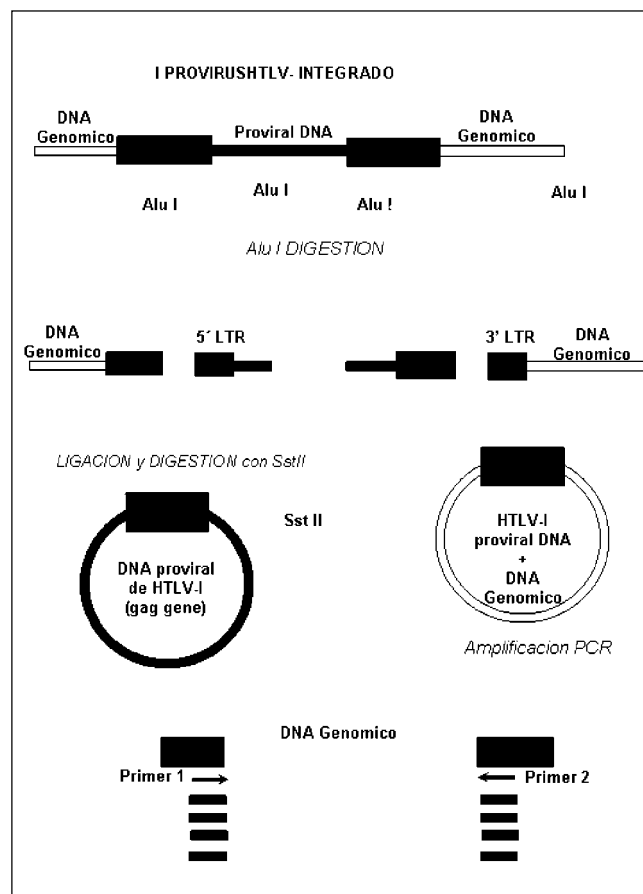


Figura 1. Estrategia general del proceso de IPCR utilizado para rescatar las secuencias de 50 bp del genoma celular que están adyacentes a los sitios de integración de los provirus HTLV-I.

digestión de los anillos dúplex formados en la etapa de auto ligación con una segunda endonucleasa de restricción, en este caso, la enzima SstII que reconoce específicamente un sitio de corte en la región U5 del LTR del genoma viral. Esta etapa es necesaria para eliminar los anillos de DNA que contengan DNA exclusivamente de origen viral, preservando así los que contengan el DNA genómico que es el que interesa en este estudio. Finalmente, en una cuarta etapa, 10 ng de los fragmentos auto ligados que no fueron digeridos por la segunda enzima de restricción fueron amplificados por PCR inverso en una primera vuelta de amplificación y por PCR directo anidado en una segunda vuelta de amplificación.

Determinación del grado de expansión clonal

Cinco microlitros de los productos de PCR fueron empleados para resolver las bandas amplificadas o amplicones de acuerdo con su tamaño molecular mediante electroforesis en geles submarinos de agarosa al 1.5% teñidos con bromuro de etidio de acuerdo con protocolos establecidos (Sambrook *et al.*, 1989). El grado de expansión clonal y el número de clones fueron calculados mediante el conteo de amplicones por muestra en las respectivas impresiones fotográficas, en donde un amplicón significa que se presentó la expansión de un solo clon –monoclonalidad– y varios amplicones evidencian que se ha presentado las expansiones simultáneas de varios clones o policlonalidad.

Protocolos de clonación

Con el fin de secuenciar los amplicones de IPCR, los fragmentos amplificados fueron recuperados por elución a partir de geles de agarosa al 2% utilizando el estuche comercial QIAEX II Agarose Gel Extraction®. Brevemente, se extrae con la ayuda de un bisturí una porción lo más delgada posible de gel que contenga el amplicón de interés para ser disuelta por calentamiento en un buffer apropiado y para luego ser combinada con una resina que se liga reversiblemente al DNA. Después de dos etapas de centrifugación y lavado con el mismo buffer, el DNA se halla precipitado con la resina y la agarosa ha sido removida. El DNA finalmente es recuperado mediante elución en buffer TE pH 8.0.

Los fragmentos de DNA producto del IPCR eluidos fueron ligados al vector pCR2.1 y transformados en células DH5a haciendo uso del estuche comercial TA cloning System® de Invitrogen. En breve, se sometieron 10 ng del producto de PCR a una reacción de ligación asistida por la ligasa de DNA del fago T4 con 50 ng del vector pCR 2.1 durante 4 horas a 14°C. Los productos de ligación

fueron luego utilizados para la transformación de las células DH5a incubándolas durante 30 minutos sobre hielo con 2 ml de cada reacción de ligación. Al término de esta etapa se sometió la mezcla a choque térmico durante 2 minutos a 42°C, e inmediatamente se colocaron sobre hielo antes de ser incubadas con medio SOC durante una hora a 37°C con agitación. Posteriormente, se sembraron en placas de medio LB que contenía X-gal y ampicilina a una concentración de 50 mg/ml y se incubaron para crecer durante 18 horas a 37°C. Al final se colocaron a 4°C durante algunas horas hasta que los cultivos desarrollaron coloración azul. Acto seguido se seleccionaron las colonias transformantes blancas para ser cultivadas en medio LB líquido. Finalmente los plásmidos recombinantes fueron extraídos mediante un protocolo de lisis alcalina ampliamente utilizado (Sambrook *et al.*, 1989) y digeridos con Eco RI para verificar que tengan el inserto del fragmento de IPCR clonado.

Secuenciación de DNA

Antes de su secuenciación los plásmidos recombinantes fueron cuantificados por espectrofotometría y purificados utilizando las columnas CENTRI-SEP® obtenidas de Princeton Separations Inc. La secuenciación de los plásmidos se realizó en un secuenciador automático ABI Prisma 370 utilizando el estuche comercial BigDye® terminator de APPLIED BIOSYSTEMS. Las mezclas finales que fueron llevadas al secuenciador para su resolución por electroforesis capilar, se obtuvieron mediante un tratamiento previo de los productos de PCR. Los productos de PCR se obtuvieron a partir de 200 ng de DNA después de 5 minutos de desnaturalización a 96°C, y 25 ciclos de amplificación consistentes en 15 segundos de desnaturalización a 96°C, 15 segundos de hibridación del cebador a 50°C y 4 minutos de extensión a 60°C. El tratamiento previo consistió en precipitar en DNA con etanol, acetato de sodio y etachinmato y una resuspensión final del DNA en un solvente cromatográfico adecuado.

Alineamientos y asignaciones de secuencias

Todos los clones de IPCR fueron analizados utilizando el programa MEGABLAST del NCBI (USA) disponible en el sitio web: (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/BLAST/>). Adicionalmente, se realizó un alineamiento para parejas de secuencias con el fin de buscar las homologías que presentaron los fragmentos de IPCR con secuencias existentes en el Genbank. Una búsqueda en la base de datos del NCBI que contiene la localización cromosómica de las secuencias del DNA humano permitió asignar la posición de los clones de IPCR secuenciados.

Hibridación sustractiva de fragmentos de AFLP de DNA humano

Las muestras de DNA de los pacientes objeto de estudio fueron analizadas mediante AFLP siguiendo la metodología original descrita por Vos *et al.*, (1995). Se utilizaron muchas combinaciones de cebadores +3 incluidas en el estuche comercial que amplificaron selectivamente algunos fragmentos de DNA. Los productos de AFLP se resolvieron en geles desnaturizantes (Urea 7.5M) de poliacrilamida al 6% y se revelaron mediante una técnica estandarizada de tinción con plata.

Una vez establecidas las condiciones de un AFLP no variante, se desarrolló el método hibridación sustractiva empleando como sonda pMT2 se evaluaron en diferentes variables tales como: relación de DNA hibridado, tiempo de hibridación, condiciones de astringencia y condiciones de separación electroforética. Una vez se logró patronizar la metodología se aplicó a 10 individuos seropositivos para HTLV-I.

En este procedimiento, se permitió la hibridación en líquido antes de correr el gel de poliacrilamida no desnaturizante, de esta manera debido al mayor tamaño molecular de la sonda comparado con el de los fragmentos de AFLP, sólo entraron en el gel los fragmentos no hibridados. Por el contrario aquellos fragmentos que hibridaron con la sonda, o sea los que contenían la secuencia proviral, fueron retenidos y no entran en la región analizable del gel, así al correr paralelamente los AFLP de individuos sin la hibridación previa (-) y los AFLP de individuos a los que si se les realizó este proceso (+ o AFLP sustractivo), es posible determinar tanto el número de bandas AFLP que contienen secuencias provirales como su tamaño molecular.

Métodos de modelación computacional

Para obtener una primera aproximación a una estructura tridimensional de la integrasa se utilizaron las secuencias de nucleótidos de la cepa ATK-1 del virus HTLV-I obtenida del Genbank (número de acceso J02029) y las secuencias de nucleótidos que codifican por IN de diversos retrovirus se obtuvieron de un trabajo publicado anteriormente (Muller *et al.*, 1999). Estas secuencias de nucleótidos se transcribieron, empleando el código genético nuclear, a otras de 300 aminoácidos que comienzan en prolina y terminan en el codón de parada del extremo 3' del gen pol. Para la alineación de las secuencias de la integrasa de varios retrovirus, se utilizó el programa CLUSTAL W versión 1.81.

Predicción de la estructura secundaria y terciaria

Para la división de los dominios de la proteína, se aplicó el programa SMART (“*Simple Modular Architectural Research Tool*”) (Schultz *et al.*, 2000; Letunic *et al.*, 2002). Este reconoce la secuencia de aminoácidos que se espera esté en la región intermedia entre dominios según lo que se conoce de otras proteínas ya estudiadas. Como método de predicción se utilizó el programa PREDICT PROTEIN (PP) de modelación por homología que se basa en la conservación de aminoácidos entre la proteína de interés y otras cuya estructura tridimensional ya es conocida. Para construir un perfil de hidropaticidad de la proteína integrasa se aplicó el algoritmo desarrollado por Kyte & Doolittle, 1982.

Análisis estadístico de los resultados

Para establecer si hubo diferencias estadísticas en el número de amplicones IPCR entre los diferentes grupos y las diferencias estadísticas en la composición de bases que flanquean el sitio de integración de se utilizó la prueba t de student. la prueba de Chi cuadrado fue utilizada para determinar la significancia de cada uno de los cuatro nucleótidos en una determinada posición en la región de 50 un flanqueadora al 3'LTR de provirus HTLV-I.

Resultados

Un modelo estructural de la Integrasa del HTLV-I

El alineamiento de las secuencias de diferentes retrovirus, mostró que la integrasa del HTLV-I tiene un tamaño de 300 aminoácidos que comienza con Prolina y termina en el codón de parada TAA en el extremo 3' del gen pol. Estructuralmente se identificaron los dominios que dividen la secuencia de los 300 residuos de aminoácidos. El dominio N-terminal que corresponde a los primeros 49 residuos de aminoácidos, el central o catalítico que incluye los residuos 50 al 212 y el C-terminal del aminoácido 213 hasta el 300.

Mediante la aplicación del algoritmo predictivo de Kyte-Doolittle, fue posible reconstruir un perfil de la hidropaticidad de la proteína. Éste definió el dominio central como altamente hidrofílico, coincidiendo varias regiones con el sitio activo, en contraste con el extremo amino en el que predominó la secuencia de aminoácidos hidrofóbicos.

La predicción del plegamiento secundario de la secuencia de los 300 aminoácidos de la integrasa del HTLV-I mostró que en el extremo N-terminal existen tres hélices α (α 1, 7-13 a.a.; α 2, 16-23 a.a.; α 3, 29-42 a.a). En la

región central catalítica la predicción mostró 5 hojas β (β 1, 64-69 a.a.; β 2, 76-86 a.a.; β 3, 91-97 a.a.; β 4, 120-123 a.a.; β 5, 209-211 a.a.) y 4 hélices α (α 4, 102-114 a.a.; α 5, 131-147 a.a.; α 6 158-176 a.a.; α 7, 183-198 a.a.). En el extremo carboxilo de la integrasa del HTLV-I se asignaron 2 hélices α (α 8, 248-254 a.a.; α 9, 273-279 a.a.) y 3 hojas β (β 6, 231-236 a.a.; β 7, 258-262 a.a.; β 8, 269-271 a.a.).

Mediante la aplicación de los métodos predictivos fue posible obtener una estructura terciaria con alto grado de confiabilidad, solamente la región central catalítica (49-221) (figura 2).

Relaciones filogenéticas de la integrasa del HTLV-I

El análisis filogenético de las secuencias que codifican por la integrasa en los distintos subtipos de HTLV-I, mostró agrupaciones con topologías muy similares (figura 3). Se observó que el subtipo cosmopolita o HTLV-Ia está separado de los subtipos HTLV-Ib y HTLV-Ic presentando valores de “bootstrap” de 99% para NJ y para MP. En este subtipo se identificaron tres subgrupos: el subgrupo A o transcontinental, el subgrupo B o Japonés y el subgrupo C o del África Occidental / Caribe. La longitud de las ramas determinadas utilizando el método ML tuvo un valor de $P < 0.01$.



Figura 2. Predicción de la estructura tridimensional del dominio central catalítico de integrasa del HTLV-I. Se destacan los residuos del sitio activo Asp 21, Asp 78, y Glu 114.

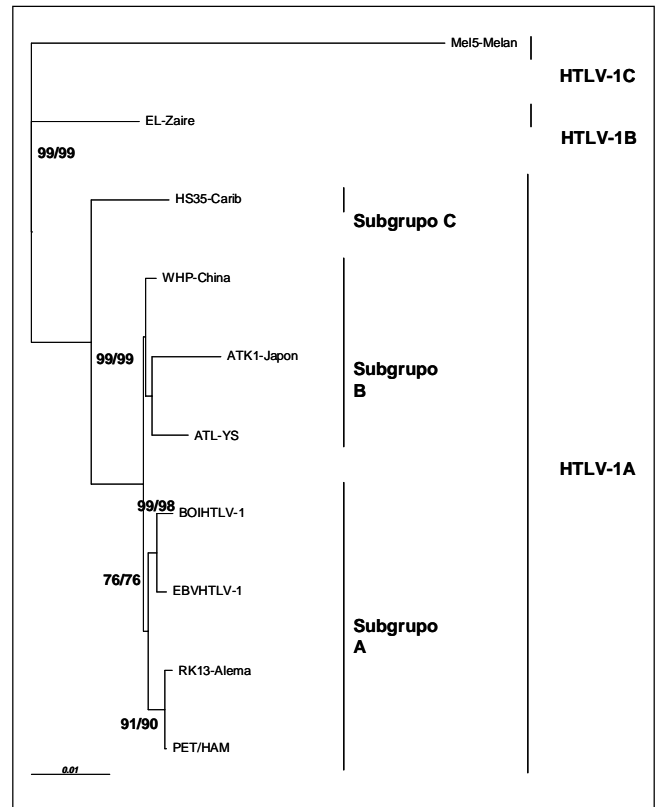


Figura 3. Agrupamiento filogenético enraizado NJ/MP de 10 aislados empleados en el análisis filogenético del virus HTLV-I de diversos orígenes geográficos, con base en secuencias nucleotídicas que codifican la proteína integrasa. Se utilizó como “outgroup” la secuencia correspondiente a Mel-5 que es un aislado melanésico. Los números al pie de cada ramificación corresponden a los porcentajes calculados por NJ y MP respectivamente. (Bootstrap de 1000).

Al comparar los diferentes aislados de HTLV-I alrededor del mundo con la secuencia consenso del mismo, se determinó que la variación en términos de distancia genética utilizando el modelo de Kimura doble Parámetro para el dominio amino N-terminal fue de 0.007 a 0.051; para el central catalítico de 0.005 a 0.084 y para el carboxilo C-terminal de 0 a 0.056. Las distancias genéticas en el dominio carboxilo fueron las más bajas. Este resultado demostró que la secuencia de nucleótidos que codifica para los diferentes dominios de la integrasa en este virus presenta, en general, una alta homología tanto a nivel de nucleótidos como de secuencias de aminoácidos.

Expansión clonal durante la infección por el HTLV-I

Los resultados de los ensayos de IPCR mostraron que los pacientes PET/HAM, ATL y portadores asintomáticos pre-

sentan estilos de integración proviral variables (figura 4). La expansión oligoclonal de clones celulares infectados se presentó tanto en pacientes PET/HAM como en portadores asintomáticos, resultado que contrastó con el encontrado en los pacientes ATL en quienes se observó un tipo de expansión tendiente a la monoclonalidad. El número de amplicones de IPCR fue significativamente mayor en pacientes PET/HAM (8.6 ± 2.5) en comparación con los pacientes ATL (2.8 ± 3) y los portadores asintomáticos (5.0 ± 1.7) ($p < 0.004$). En el grupo de pacientes PET/MAH ubicados en un rango de edades de 40-60 años se registró el menor número de clones infectados con provirus de integración (6.4 ± 1.1), contrastando con lo encontrado en los pacientes más jóvenes (10.0 ± 2.9) ($p < 0.019$) o en los pacientes mayores (11.5 ± 2.1) ($p < 0.003$). No se encontraron diferencias en el número de amplicones de IPCR entre sexos o grupos étnicos.

Estructura del sitio flanqueante de la integración proviral

Se estudió tanto la composición de bases como la identificación de secuencias que flanquean el sitio de integración de provirus del HTLV-I. En los pacientes PET/HAM, la región del DNA celular de 50 pares de bases que flanquea al correspondiente provirus HTLV-I, mostró una composición de 21% A, 21.2% T, 29.7% G y 27.9% C. Un análisis de su distribución de bases mostró en esa región una G en la posición 7 es la única base que se presenta invariable. El porcentaje del contenido GC en esta región flanqueadora fue de $57.6 \pm 6.93\%$ el cual es significativamente más alto que el que se obtuvo en un grupo control de 60 secuencias celulares tomadas al azar del GenBank en las que el contenido en GC de $42.2 \pm 6.3\%$ ($p < 0.001$) (figura 5a).

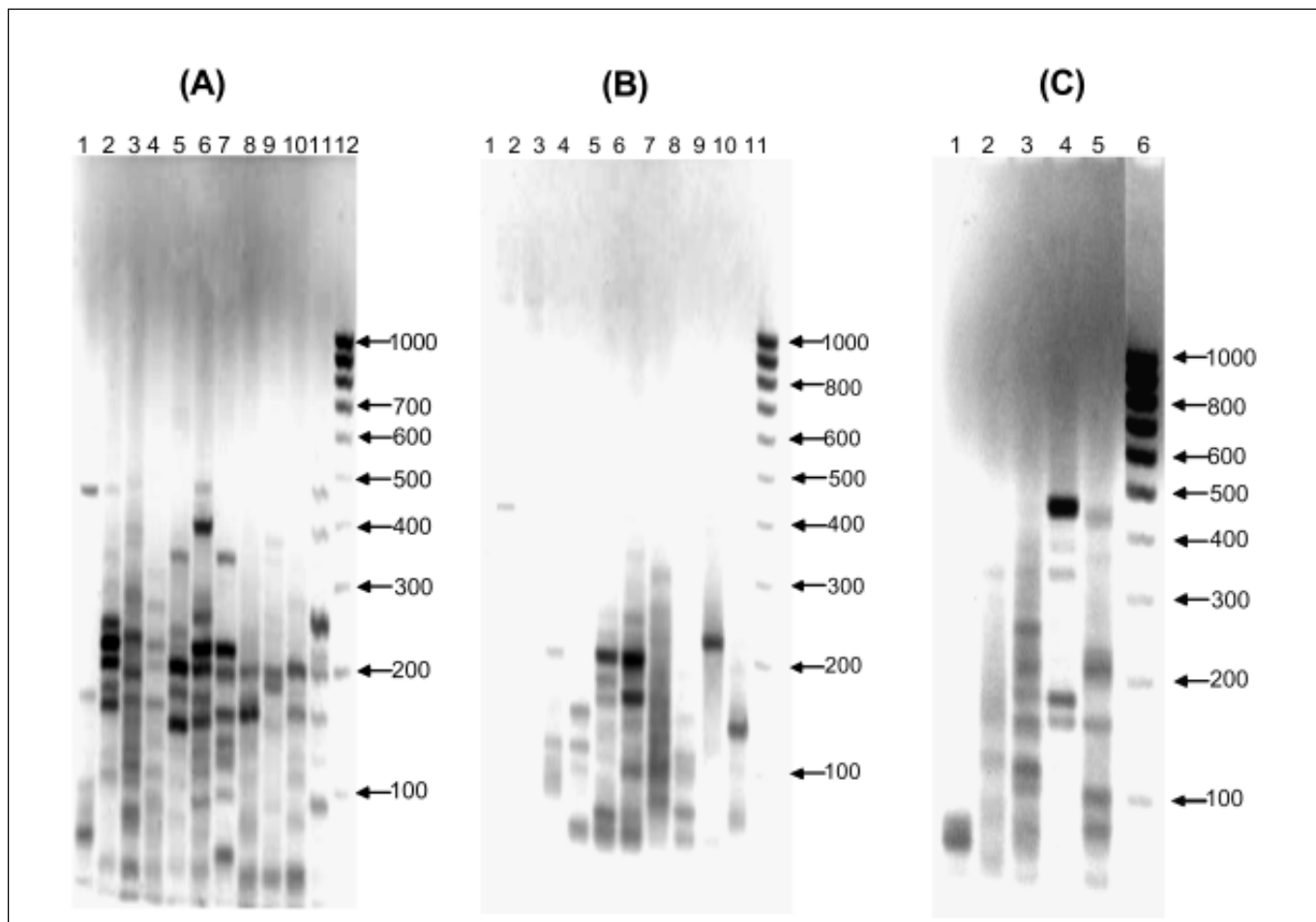


Figura 4. Expansión clonal en individuos seropositivos para el HTLV-I. Electroforesis de los productos de IPCR de individuos seropositivos para el HTLV-I. (A) Pacientes PET/HAM (1-11); (12). Marcador de tamaño molecular de 100 bp. (B) Portadores asintomáticos (1-10); (11). Marcador de tamaño molecular de 100 bp. (C) Pacientes ATLL. (1-5); (6). Marcador de tamaño molecular de 100 bp. (bp: par de bases).

La composición de bases en una región de 50 nucleótidos del DNA celular que flanquea a la integración proviral en los pacientes ATL fue de 24.7% A, 19.6% T, 28.6% G y 27.5% C. No se encontró ninguna base particularmente significativa en ninguna posición. El promedio del contenido GC fue de $56.1 \pm 12.9\%$, que es significativamente mayor que en el grupo control de secuencias ($p < 0.001$) (figura 5b).

Para los portadores asintomáticos la composición de bases fue 18.1% A, 14.6% T, 32.8% G y 34.3% C. No se encontraron bases significativas en ninguna posición. El contenido total de GC fue de $67.2 \pm 27.8\%$, el cual fue significativamente mayor que el contenido de GC en la secuencias

control ($p < 0.001$) (figura 5c). La composición nucleotídica en las regiones flanqueadoras al provirus HTLV-I en el paciente superinfectado con *Srongiloides stercoralis* fue así: 17.9% A, 21.5% T, 29.8% G and 30.7% C. En éste se observó una tendencia similar en el contenido de GC, (60.5 ± 18.1) fue significativamente mayor que en la secuencia control ($p < 0.01$). El grupo de pacientes PET/MAH que tenían mas de 60 años presentó una tendencia a integrar el provirus HTLV-I en regiones con un mayor contenido de GC que en los demás grupos de diferentes edades.

Caracterización de las secuencias del DNA celular que flanquean el sitio de integración proviral

Noventa y uno por ciento (56/61) de los clones de IPCR de pacientes PET/HAM exhibieron un alto nivel de homología con secuencias de cDNA de varias líneas celulares tumorales y de tejidos normales. Utilizando el programa Mega Blast se localizó su posición cromosómica en el genoma humano. Las secuencias de nucleótidos de varios clones IPCR mostraron frecuente homología con una secuencia localizada en el cromosoma 9 (NT-019501) que apareó también con la secuencia de un cDNA correspondiente a un cDNA de fibroteoma ovárico (BF-058575) y a un cDNA de un adenocarcinoma de colon (BG-248551). Otras secuencias de inserción aparearon frecuentemente con la secuencia NT-010404-02 ubicada en el cromosoma 16. Los apareamientos respectivos con secuencias de cDNAs fueron con las secuencias cuyo código de acceso AW575915 corresponde a células B centrales germinales. Únicamente 3 secuencias flanqueadoras aparearon con elementos repetitivos VNTR.

La integración del provirus HTLV-I no se presentó en todos los cromosomas. La frecuencia de integración de provirus HTLV-I en pacientes PET/HAM se distribuyó asimétricamente en diferentes cromosomas. Los cromosomas con la más alta frecuencia de integración fueron el 8, el 9 y el 16. De otra parte los cromosomas 3, 17 y 19 y el X, presentaron una frecuencia intermedia de integración del provirus. En los cromosomas 4, 7, 11 12, 14, 15, 18, 20, 21, 22 y Y de los pacientes PET/HAM estudiados no se observó ninguna integración proviral.

El 42% (9/21) de las secuencias flanqueadoras al provirus HTLV-I en los pacientes ATLL mostraron un alto nivel de homología con secuencias de cDNA ubicadas principalmente en el cromosoma 18, algunas de ella fueron las secuencias B1740308, BM509305 y HOA60-1-E3.R. En los portadores asintomáticos todas las secuencias de inserción del HTLV-I estuvieron el cDNAs especialmente ubicados en el cromosoma 9, entre ella se destacan las secuencias BG765890, BG535750 and BG 244851.

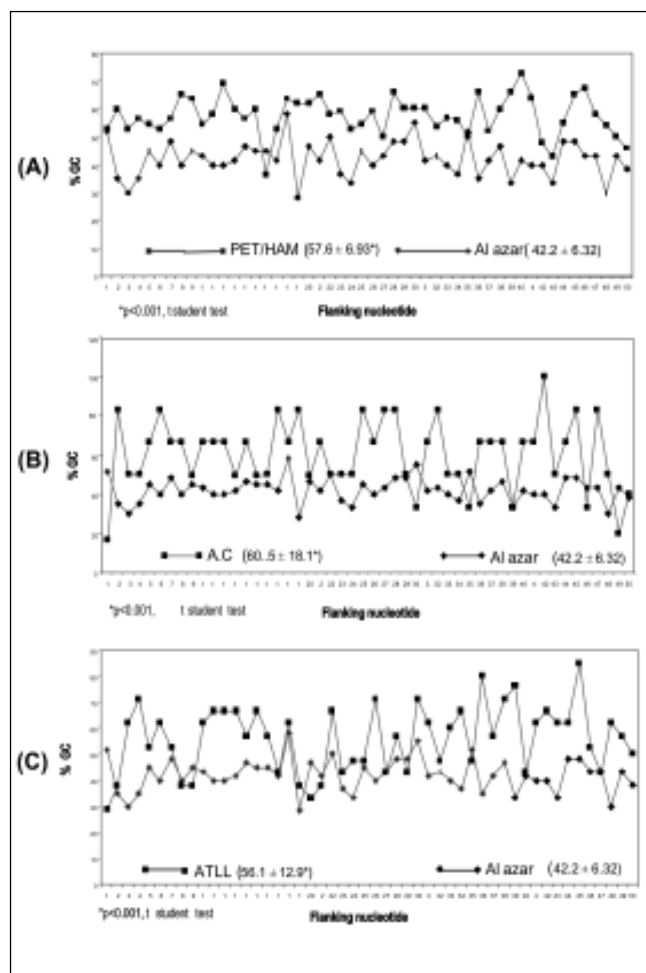


Figura 5. Comparación del contenido de GC entre regiones de 50 pb que flanquean al provirus HTLV-I y secuencias no virales del genoma humano. (A). Pacientes PET/HAM (B). Portadores asintomáticos (C). Pacientes ATL. Las diferencias en el contenido de G:C, se calcularon mediante una prueba de X^2 con un nivel de significancia estadística mayor del 95%.

Sustracción de fragmentos de AFLP

El análisis de los patrones electroforéticos obtenidos en los ensayos de AFLP sustractivo en 10 pacientes PET/HAM reveló la existencia de fragmentos de AFLP conteniendo secuencias de HTLV-I de tamaño molecular variable entre los individuos infectados por HTLV-I analizados (figura 6a). El análisis estadístico entre el número de bandas no hibridadas y el de hibridadas entre individuos fue

estadísticamente significativo ($p < 0.006$). El análisis entre bandas AFLP hibridadas y no hibridadas para diez individuos que se incluyeron en el estudio mostró un número variable de éstas (figura 6b). De un total de 40 bandas AFLP registradas, se observaron patrones de hibridación de la sonda LTR con fragmentos de tamaño molecular común en el 100% (10/10) de los individuos; fueron significativamente sustraídos los fragmentos de tamaños moleculares aproximados de 300, 320 y 350 pb ($p < 0.01$).

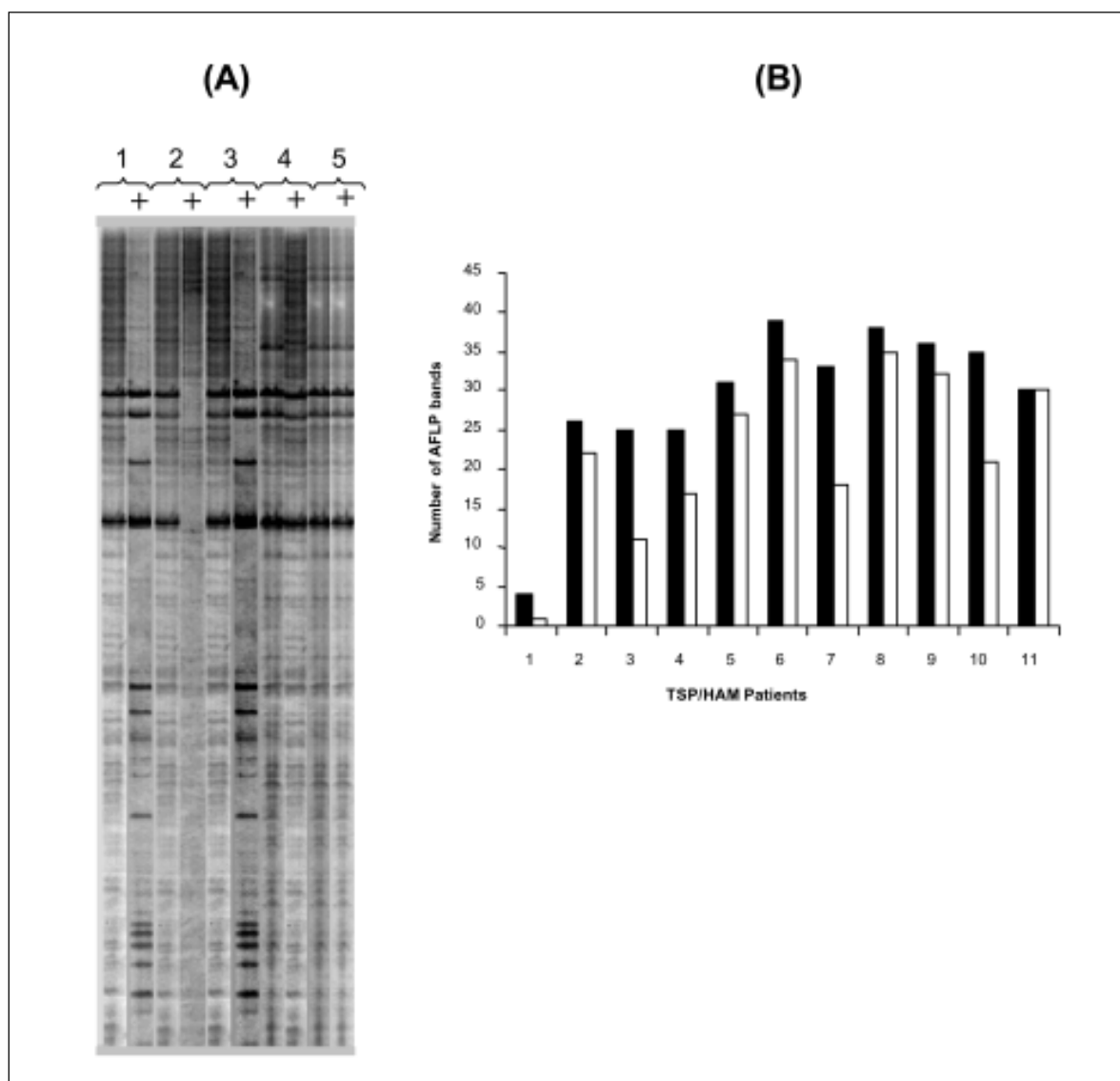


Figura 6. Ensayo de Hibridación Sustractiva de Fragmentos de AFLP (EHS AFLP) con una sonda 3'-LTR del HTLV-I. (A). Patrón electroforético de fragmentos AFLP del DNA de cinco pacientes PET/HAM que fueron hibridados con la sonda LTR y separados mediante electroforesis en geles de poliacrilamida-Urea (6%) en condiciones no desnaturalizantes. (B). Distribución de fragmentos AFLP del DNA de 10 pacientes PET/HAM del Pacífico colombiano hibridados con la sonda LTR del HTLV-I.

Discusión

En este trabajo se obtuvieron resultados con respecto a la biología molecular y la genómica estructural del proceso de integración del HTLV-I. En su conjunto se estableció un modelo de predictivo de la integrasa del HTLV-I, así como la demostración que el proceso de integración de este virus al genoma de células linfocitarias que no es completamente al azar. Además demostramos que la expansión clonal en células linfocitarias siendo mayor en los pacientes PET/HAM.

El modelo de la integrasa del HTLV-I obtenido en este trabajo, mostró similitudes con los dominios descritos para la integrasa del ASV (Bujacz *et al.*, 1996), sin embargo en el dominio carboxilo terminal, se observaron algunas diferencias en la distribución de los dominios de hélices beta plegadas. El haber obtenido un modelo computacional de la integrasa del HTLV-I se constituye en una herramienta predictiva tanto para poder evaluar efectos de mutaciones introducidas por mutagénesis sitio dirigida como para el desarrollo de nuevos fármacos para su utilización como antirretrovirales. En este sentido las actuales terapias antirretrovirales se han enfocado principalmente en las enzimas proteasa y transcriptasa reversa, pero los resultados no han sido satisfactorios porque siempre se producen mutaciones que le permiten al virus resistir a las drogas administradas. Por esta razón, el blanco terapéutico antiviral más promisorio es la integrasa.

Se obtuvieron datos sobre las características moleculares de las secuencias que flaquean muchos sitios de integración del provirus HTLV-I en linfocitos de sangre periférica de individuos naturalmente infectados. En términos generales, la característica común de las secuencias de 50 pb flanqueadoras 3' al provirus HTLV-I integrado fue su alto contenido de bases G y C, hecho que contrasta con el moderado contenido en bases GC que presentó un grupo de secuencias genómicas de igual extensión seleccionadas aleatoriamente de la base de datos del Genbank.

Estos resultados muestran que el HTLV-I integrado provoca una expansión oligoclonal de las células infectadas especialmente en pacientes PET/HAM, observación que concuerda con las observaciones reportadas por Yoshida *et al.*, 1989; Yamaguchi *et al.*, 1988; Wattel *et al.*, 1995; Wattel *et al.*, 1996 & Cavrois *et al.*, 1996. El grado de expansión clonal que se observó en pacientes PET/HAM fue significativamente mayor que los observados tanto en los pacientes ATLL como en los individuos asintomáticos portadores de HTLV-I incluidos en el presente estudio. No obstante, el grado de expansión clonal

no se presenta de manera uniforme entre todos los pacientes PET/HAM, así, el subgrupo de pacientes PET/HAM de edad avanzada fue el que exhibió el más alto grado de expansión clonal. Cualquier posible explicación para este resultado debe considerar que la principal característica patológica de la enfermedad consiste en un proceso inflamatorio que ocurre en muchas áreas de la médula espinal. Puesto que la desmielinización es un evento que ocurre de manera progresiva y muy lentamente, es lógico inferir que la infección con HTLV-I en los individuos de edad avanzada ha debido progresar durante el transcurso de muchos años. Otras evidencias que dan soporte a una hipótesis de tal naturaleza lo constituyen las altas cargas provirales registradas en sangre periférica de pacientes PET/HAM y la existencia de una reacción cruzada específica de anticuerpos tipo IgG contra HTLV-I y una proteína de 98-100 kDa perteneciente a la médula espinal normal como lo han reportado García-Vallejo *et al.*, 2005. Con base en la presente evidencia experimental se sugiere que la infección con HTLV-I a largo plazo conduce a un empobrecimiento del normal funcionamiento de sistema inmunitario.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo mostraron que la integración del HTLV-I *in vivo* dentro del ADN de los individuos infectados no es un proceso que se verifique de manera aleatoria, resultados que concuerdan completamente con los obtenidos en los estudios publicados por Craigie, 1992; Leclercq *et al.*, 2000; Hann *et al.*, 1983; Salinas *et al.*, 1987 & Chou *et al.*, 1996. Específicamente se encontró que las secuencias de 50 pb que flanquean al provirus HTLV-I integrado tienen una gran riqueza en bases GC. Esta observación, basada en el análisis de las secuencias, coincide con las obtenidas en un estudio previo realizado por Zoubak *et al.*, 1994, mediante la técnica de fraccionamiento composicional del genoma humano. Estos autores mostraron que el provirus HTLV-I se integraba en los isocoros ricos en GC del genoma humano. El contenido de GC es una característica muy útil cuando se trata de discriminar diferentes regiones genómicas. En este sentido, el genoma humano se encuentra compartimentalizado en diferentes áreas con contenidos diferenciales en su composición nucleotídica, a las que Bernardi 1989 denominó isocoros (Cavrois *et al.*, 1996). Los isocoros en consecuencia, presentan variabilidad en su contenido de GC y es así como es posible diferenciar el componente rico en GC del genoma humano. Las observaciones realizadas en el presente trabajo muestran que el contenido de GC de las secuencias genómicas de 50 pb que flanquean los sitios de integración de los provirus HTLV-I es más alto en las secuencias que albergan un provirus integrado que en secuencias

equivalentes de individuos no infectados que fueron seleccionadas al azar. Mediante esta observación puede inferirse la existencia de un efecto que predispone para que la integración se verifique en los sitios ricos en GC y este efecto sería independiente del estado clínico de los individuos infectados, puesto que no se observaron diferencias en los contenidos de GC entre pacientes PET/HAM, ATLL, el individuo superinfectado con *S. stercoralis* y en los portadores asintomáticos. Estudios previos llevados a cabo en modelos animales por **Mooslehner et al.**, 1990, han mostrado que la conformación de la cromatina blanco constituye un factor importante para la integración de provirus y específicamente es promovida hacia las cercanías de las regiones transcritas. Puesto que se ha encontrado que las secuencias ricas en GC promueven un alto grado de curvatura en el ADN de la cromatina como lo demostraron **Leclercq et al.**, 2000, se puede proponer que las secuencias ricas en GC que flanquean al provirus HTLV-I integrado constituyen un parámetro crítico para discriminar los potenciales blancos de integración.

Los resultados obtenidos en este trabajo, constituyen una clara demostración de que las secuencias províricas de individuos seropositivos de diferentes regiones de Colombia, no se integraron aleatoriamente, sugiriendo que el proceso de integración puede estar dirigido por factores asociados a la secuencia.

Las observaciones hechas en el presente estudio muestran que las regiones flanqueadoras al provirus HTLV-I integrado no tienen una composición nucleotídica especialmente rica en AT. Este resultado está en abierta contradicción con las observaciones obtenidas por **Leclercq et al.**, 2000, quienes registran un alto contenido de nucleótidos AT para estas regiones flanqueadoras al provirus HTLV-I integrado. Otra diferencia sustancial que muestra ese estudio con el presente, es que solo el 33% de sus secuencias flanqueadoras al provirus HTLV-I integrado se ubicaron en unidades transcripcionales del genoma humano. Una explicación posible para la discrepancia puede radicar en que los individuos analizados aquí, provenían de la región del Pacífico colombiano, sobre los cuales, como ya se ha demostrado en el presente estudio filogenético pertenecen al subgrupo B japonés, a diferencia de los individuos de Martinica que esos autores estudiaron y que pertenecerían muy probablemente al subgrupo cosmopolita A. En consecuencia, se postula que la diferencia genética de los virus podría incidir en el sitio blanco de la integración del retrovirus. Otra de las posibles explicaciones que justifican la discrepancia estriba en que para realizar el presente estudio se extrajo directamente el DNA de linfocitos de individuos infecta-

dos, sin pasar por las etapas de cultivo de linfocitos que realizaron esos autores. Ese hecho indudablemente permite que los virus se repliquen en condiciones diferentes a las fisiológicas con las correspondientes consecuencias en la movilidad que ellos presentan entre los genomas de las células sometidas a cultivo.

En el presente estudio se hizo una estratificación de los individuos naturalmente infectados en varios grupos con base en su diagnóstico clínico. Analizando el tipo de secuencias que flanquean el sitio de integración del provirus HTLV-I se observó que muchos de los clones fueron identificados como correspondientes a muchos cDNAs de diferentes tejidos. Así, el 91% de las secuencias flanqueadoras al provirus HTLV-I en pacientes PET/HAM pudieron ser ubicadas dentro de unidades transcripcionales. Un 42% de las secuencias flanqueadoras lo hicieron dentro de unidades transcripcionales en pacientes ATLL y la totalidad de las secuencias flanqueadoras al provirus HTLV-I se ubicaron en dichas unidades en los portadores asintomáticos. Sin embargo, solo 3 secuencias repetitivas VNTR pudieron ser identificadas en pacientes PET/HAM y ninguna en pacientes ATLL o en portadores sanos. Estos resultados sugieren que existe una posible asociación entre los sitios de integración y la patología subyacente. Esto constituye una fuerte evidencia que recalca la necesidad de explorar tal relación.

En el presente estudio se pudo determinar que los loci cromosómicos donde se presenta más favorablemente la integración del HTLV-I, están localizados en los cromosomas 8, 9 y 16. Resultados similares que soportan los presentes fueron obtenidos en trabajos previos llevados a cabo por **Glukhova et al.**, 1999, quienes mediante el uso de la técnica de hibridación fluorescente *in situ* evidenciaron la preferencialidad de la integración del provirus HTLV-I hacia loci cromosómicos ubicados en los cromosomas 4, 6, 9, 15 y 16.

A pesar que la mayoría de las regiones del genoma humano pueden ser accesibles a la maquinaria de la integrasa; este proceso tiene una direccionalidad orientada hacia unos pocos cromosomas. Estos resultados implican la existencia de un sitio común de integración que está favorecido como un sitio caliente de integración del provirus HTLV-I. Este resultado nuevamente constituye otra vez una prueba de que el HTLV-I no se integra aleatoriamente a nivel de secuencia ni tampoco a nivel cromosómico.

Los estudios previos en los que se ha intentado construir un panorama genómico de la integración proviral se

basaron esencialmente en la hibridación por Southern Blot y en el IPCR; estas dos metodologías demandan procedimientos de muchos pasos que requieren caracterización posterior por secuenciación. De otra parte no reflejan el polimorfismo en la integración de secuencias provirales en el genoma de la célula infectada. En este trabajo por primera vez se desarrolló y probó un método que permitió analizar la localización genómica de secuencias provirales empleando una metodología de barrido genómico de polimorfismos como es el AFLP.

El análisis estadístico efectuado entre el número de amplicones hibridados dentro de cada individuo y entre individuos portadores del HTLV-I mostró diferencias estadísticamente significativas. Este resultado es una evidencia fuerte que permite sustentar la hipótesis de un número variable de blancos de integración en el genoma de la célula infectada, el cual fue variable para los individuos PET/HAM incluidos en este estudio.

Este método se convierte en una herramienta poderosa para analizar a nivel genómico el perfil de integración que tiene el DNA de una célula infectada puesto que el método no requiere más que los protocolos de AFLP clásico. Sería un complemento para estudiar el patrón de integración con el progreso de la infección sistémica en los individuos que permitiría un seguimiento más detallado de la infección y su progreso con la enfermedad. Y puede además ser extrapolado al estudio de la integración de otros retrovirus humanos tales como HTLV-II y HIV-1 y 2 en los que sería una herramienta predictiva en la valoración de la efectividad de terapias antirretrovirales.

La integración del DNA proviral es un proceso crucial en el ciclo de vida de todo retrovirus. Se ha estudiado en detalle los diferentes aspectos de la integración de provirus HTLV-I en pacientes PET/HAM y ATLL y en portadores asintomáticos. En su conjunto los resultados demostraron que el estilo de integración y sus consecuencias a nivel genómico y celular son diferentes en cada estadio de la infección. Fue interesante obtener resultados que demostraron que en los pacientes PET/HAM existe un agresivo proceso de expansión clonal y un amplio rango de integración proviral al DNA de la células infectadas, este hecho refleja el polimorfismo integracional en regiones ricas en GC no al azar que se observó para los pacientes PET/HAM que fueron estudiados. Los resultados obtenidos en este trabajo, han permitido continuar las investigaciones en el sentido de poder ensayar principios activos naturales derivados del café, que puedan inhibir selectivamente la integrasa del HTLV-I. Puedo afirmar que en un plazo corto tendremos resultados que nos permitirán abordar la infección con el HTLV-I bajo un nuevo

enfoque terapéutico, pudiendo ser este de bajo costo y accesible a la población infectada por el HTLV-I tanto en nuestro país como en otras regiones del mundo.

Agradecimientos

A todos mis colaboradores quienes a lo largo de más de ocho años de trabajo, lograron acumular un conocimiento suficiente para poder tener un panorama más amplio de la infección por este virus así como disponer actualmente de opciones terapéuticas potenciales para enfocar un tratamiento. En especial a Martha Domínguez, Jesús Cabrera, Adalberto Sánchez y todos mis estudiantes del Doctorado en Ciencias Biomédicas de la Facultad de Salud de la Universidad del Valle. A todas aquellas personas infectadas por el virus quienes mediante su colaboración han permitido estudiar en detalle tanto la infección como los aspectos moleculares de de este importante retrovirus que constituye un problema serio de Salud Pública en nuestro País. A mis amigos Max Essex, Yoshito Eizuru, Suminori Akiba, Vladimir Zaninovic, Boris Renjifo e Isabella Borrero con quienes pude trabajar de manera directa en los problemas del HTLV-I. A Liliana Castro asesora y Luz Mary Mejía secretaria de la Subdirección de Programas de Desarrollo Científico y Tecnológico de Colciencias. A la Fundación Fogarty/NIH, a Colciencias, Fundación Banco de la República, Colombia, el Ministerio de Cultura y Educación del Japón, la Escuela de Salud Pública de la Universidad de Harvard, la Universidad de Kagoshima y muy especialmente a la Universidad del Valle sin las cuales no hubiese tenido el apoyo financiero y logístico para realizar las investigaciones.

Bibliografía

- Andrake M. & A. Skalka.** 1996. Retroviral integrase, putting the pieces together; *Journal of Biological Chemistry*. 271, 19633-19636.
- Balcázar N, Sánchez G. & F. García-Vallejo.** 2003. Sequence and phylogenetic analysis of Human T-Lymphotropic Virus type 1 from Tumaco, Colombia. *Mem Inst Oswaldo Cruz*. 98: 641-648.
- Bernardi, G.** 1989. The isochore organization of the human genome. *Annu Rev. Genet.* 23: 637-661.
- Blattner W.A., R.J. Biggar, S.H. Weiss, J.W. Clark, J.J. Goedert.** 1985. Epidemiology of human lymphotropic retroviruses: an overview. *Cancer Res.* (9 Suppl): 4598s-4601s.
- Bujacz, G., M., Jaskolski, J. Alexandratos, A. Wlodawer, G. Merkel, R.A. Katz, & A.M. Skalka.** 1996. The catalytic domain of avian sarcoma virus integrase: conformation of the active site residues in the presence of divalent cations. *Structure* 4:89-96.
- Cabrera J. & F. García-Vallejo.** 2000. Aumento del número de amplicones obtenidos por IPCR en el ADN de personas seropositivas para HTLV-I afectadas con PET/HAM. *Colombia Médica*. 31: 169-175.

- Cavrois M., A. Gessain, S. Wain-Hobson & E. Wattel.** 1996. Proliferation of HTLV-I infected circulating cells in vivo in all asymptomatic carriers and patients with TSP/HAM. *Oncogene*. 12: 2419-2423.
- Coffin JM.** 1992. Retroviridae and their replication. In: *Virology*. Fields BN, Knipe DM., (eds). New York. Raven Press, pp. 1437.
- Cortés A. & F. García.** 1996. Prevalencia de marcadores para infecciones transmisibles por transfusión en donantes voluntarios. *Colombia Médica*. 27: 3-10.
- Craigie, R.** 1992. Hotspots and warm spots: integration specificity of retroelements. *Trends Genet.* 8(6):187-90.
- Chávez M, M.C. Domínguez, A. Blank, M. Quintana, Y. Eizuru & F. García-Vallejo.** 2004. Reconstrucción de la evolución molecular de la infección actual por el Virus Linfotrópico Humano Tipo I (HTLV-I) en Colombia. *Biomédica*. 24: 65-72.
- K.S. Chou, A. Okayama, L.J. Su, T.H. Lee, & M. Essex.** 1996. Preferred nucleotide sequence at the integration target site of human T-cell leukemia virus type I from patients with adult T-Cell leukemia. *Int J Cancer*, 3: 65: 20-24.
- Dangond, F., J.S. Daza, A. Rosania, et al.** 1995. Tropical Spastic Paraparesis in the Caribbean coast of Colombia. *J. Trop. Med. Hyg.* 52:155-158.
- Domínguez M. C., A. Castillo, J. Cabrera, Y. Eizuru, S. Akiba & F. García-Vallejo.** 2002. Envelope sequence variation and phylogenetic relations of human T-Cell Lymphotropic Virus (HTLV) Type I from endemic areas of Columbia. *AIDS Res Hum Retroviruses* 18: 887-890.
- Furukawa Y., M. Yamashita, K. Usuku, S. Izumo, M. Nakagawa, M. Osame.** 2000. Phylogenetic Subgroups of Human T cell Lymphotropic Virus (HTLV-I) Type I in the *tax* gene and their association with different Risks for HTLV-I-Associated Myelopathy/Tropical Spastic Paraparesis. *J Infect Dis*. 182:1343-1349.
- García-Vallejo F., M. Chávez, M.C. Domínguez, A. Blank.** 2000. Microagregación genética y geográfica de aislados del virus linfotrópico humano Tipo I (HTLV-I) en zonas endémicas del suroccidente de Colombia. *Colombia Médica*. 31: 110-117.
- _____, & **V. Zaninovic.** 2002. Origen y diseminación del virus Linfotrópico Humano de células T Tipo I (HTLV-I) en Colombia. *Médica Sánitas* 5: 44-63.
- García-Vallejo F.** 1996. Molecular and immunological characteristics In the pathogenesis of tropical spastic paraparesis- HTLV-I associated myelopathy (TSP/HAM). *Revista Ciencia y Cultura* 48:351-358.
- _____, **R. Bonilla, G. Gallego, M. Rugeles & I. Borrero.** 1992. Amplificación de segmentos de DNA del virus linfotrópico humano (HTLV-I) en pacientes con paraparesia espástica tropical y seropositivos asintomáticos. *Colombia Médica*. 23:50-56.
- _____, **M.C. Domínguez & O. Tamayo.** 2005. Autoimmunity and molecular mimicry in tropical spastic paraparesis/human T-lymphotropic virus-associated myelopathy. *Braz. J. Med. Biol. Res.* 38:241-250.
- _____, **B. Renjifo, M. Essex.** 1995. Nucleotide sequence variation in the envelope of patients with tropical spastic paraparesis/ Human T-cell leukemia virus type I-associated myelopathy. *AIDS Res Hum. Retrovirol.* 10: 283.
- Gessain A., F. Barin, J.C. Vermant, O. Gout, L. Maurs, A. Calender, G. de The.** 1985. Antibodies to Human T lymphotropic virus type I in patients with tropical spastic paraparesis. *Lancet* 2: 402.
- Glukhova LA., S.V. Zoubak, A.V. Rynditch, G.G. Miller, I.V. Titova, N. Vorovyeva, Z.V. Lazurkevitch, A.S. Graphodatskii, A.A. Kushch, & G. Bernardi.** 1999. Localization of HTLV-1 and HIV-1 proviral sequences in chromosomes of persistently infected cells. *Chromosome Res.* 7:177-183.
- Goff SP.** 1990. Integration of retroviral DNA into the genome of he infected cell. *Cancer Cells*. 2:172-178.
- _____, 1992. Genetics of retroviral integration. *Annu. Rev. Genet.* 26: 227-544.
- Hann B. et al.** 1983. Common site of integration of HTLV in cells of three patients of with mature T Cells leukemia/Lymphoma. *Nature* 303: 253-256.
- Hinuma Y., K. Nagat, M. Hanaoka, M. Nakai, T. Matsumoto, K.I. Kinoshita, S. Shirakawa, I. Miyoshi.** 1981. Adult T-cell leukemia: antigen in an ATL cell line and detection of antibodies to the antigen in human sera. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 78: 6476-6480.
- Ijichi S., K. Tajima, V. Zaninovic, F.E. Leon-S, Y. Katahira, S. Sonoda, T. Miura, M. Hayami, W.W. Hall.** 1993. Identification of human T cell leukemia virus type Iib infection in the Wayu, an aboriginal population of Colombia. *Jpn J Cancer Res.* 84: 1215-1218.
- Katzman M. & R.A. Skalka.** 1999. Substrate recognition by retroviral integrases. *Adv Virus Res.* 52: 371-395.
- Kimura I, T. Tsubota, S. Tada, J. Sogawa.** 1986. Presence of antibodies against adult T cell leukemia antigen in the patients with chronic respiratory diseases. *Acta Med Okayama.* 40: 281-284.
- Kyte J. & R.F. Doolittle.** 1982. A simple method for displaying the hydrophobic character of a protein. *J. Mol. Biol.* 157: 105-132.
- La Grenade L., B. Hanchard, V. Fletcher, B. Cranston, W. Blattner.** 1990. Infective dermatitis of Jamaican children: a marker for HTLV-I infection. *Lancet*. 336(8727): 1345-1347.
- Leclercq I, F. Mortreux, M. Cavrois, A. Leroy, A. Gessain, S. Wain-Hobson & E. Wattel.** 2000. Host sequences flanking the human T-cell leukemia virus type 1 provirus in vivo. *J Virol* 74: 2305-2312.
- _____, **A.S. Gabet, C. Jonsson, & E. Wattel.** 2000. Basis of HTLV type 1 target site selection. *AIDS Res Hum Retroviruses*. 2000. 16(16): 1653-1659.
- Leon-Monzon M., I. Illa & M.C. Dalakas.** 1994. Polymyositis in patients infected with human T-cell leukemia virus type I: the role of the virus in the cause of the disease. *Ann Neurol.* 36: 643-649.

- Letunic I, L. Goodstadt, N.J. Dickens, T. Doerks, J. Schultz, R. Mott, F. Ciccarelli, R.R. Copley, C.P. Ponting, & P. Bork.** 2002. Recent improvements to the SMART domain-based sequence annotation resource. *Nucleic Acids Res* 30: 242-244.
- Mochizuki M., T. Watanabe, K. Yamaguchi, K. Takatsuki, K. Yoshimura, M. Shirao, S. Nakashima, S. Mori, S. Araki & N. Miyata.** 1992. HTLV-I uveitis: a distinct clinical entity caused by HTLV-I. *Jpn J Cancer Res.* **83**(3): 236-239.
- Mooslehner K., U. Karls, & K. Harbers.** 1990. Retroviral integration sites in transgenic Mov mice frequently map in the vicinity of transcribed DNA regions. *J Virol.* **64**: 3056-3058.
- Mueller, N.** The epidemiology of HTLV-I infection. 1991. *Cancer Causes Control.* **2**: 37-52.
- Mueller B., & H.G. Krausslich.** 1999. Characterization of human T-cell leukemia virus type I integrase expressed in *Escherichia coli*; *Eur. J. Biochem.* **259**, 79-87.
- Nishioka K., I. Maruyama, K. Sato, I. Kitajima, Y. Nakajima, M. Osame.** 1989. Chronic inflammatory arthropathy associated with HTLV-I. *Lancet.* **1**:441.
- Ohshima K., M. Kikuchi, Y. Masuda, Y. Sumiyoshi, F. Eguchi, H. Nohtai, M. Takeshita & N. Kimura.** 1992. Human T-cell leukemia virus type I associated lymphadenitis. *Cancer.* **69**: 239-248.
- Osame M., K. Usuku, S. Izumo et al.** 1986. HTLV-I associated myelopathy a new clinical entity. *Lancet* **1**: 1031-1032.
- Poiesz BJ., F.W. Ruscetti, A.F. Gadzar, P.A. Bunn, J.D. Minna, & R.C. Gallo.** 1980. Detection and isolation of Type C retrovirus particles from fresh and cultured lymphocytes of a patient with cutaneous T.cell lymphoma. *Proc. Natl. Accad. Sci. USA.* **77**: 7415.
- Quintana M, J. Villalobos, M.C. Domínguez, O. Tamayo & F. García Vallejo.** 2004. Estudio de la seroprevalencia de la infección por los virus linfotrópicos humanos (HTLV) I y II en poblaciones del departamento de Córdoba, Colombia. *Colombia Médica.* **35**: 22-30.
- Renjifo B., L. Soto, F. García-Vallejo, & M. Essex.** 1996. Human T cell leukemia virus type I (HTLV-I) molecular genotypes and disease outcome. *AIDS Res Hum. Retrovirol.* **13**: s146-s153.
- Renjifo B. J. Osterman, I. Borrero & M. Essex.** 1995. Nucleotide sequence of Human T-Lymphotropic virus Type I (HTLV-I) from a family cluster with tropical spastic paraparesis/HTLV-I associated myelopathy. *Res Virol.* **146**: 93-99.
- Salinas J. et al.** 1987. Nonrandom distribution of MMTV proviral sequences in the mouse genome. *Nucleic Acid Res.* **15**:3009-3022.
- Sambrook J., E.F. Fritsch, & T. Maniatis.** 1989. *Molecular Cloning. A laboratory manual.* Cold Spring Harbor Press.
- Sandmeyer, S.B., L.J. Hansen & D.L. Chalker.** 1990. Integration specificity of retrotransposons and retroviruses. *Annu. Rev. Genet.* **24**:491-518.
- Schultz J., R.R. Copley, T. Doerks, C.P. Ponting, & P. Bork.** 2000. SMART: A Web-based tool for the study of genetically mobile domains *Nucleic Acids Res,* **28**: 231-234.
- Seiki M., S. Hatari, Y. Hirayama & M. Yoshida.** 1983. Human adult T-cell leukemia virus : complete nucleotide sequence of the provirus genome integrated in leukemia cell DNA. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* **80**: 3618-3622.
- Shimoyama, M.** 1991. Diagnostic criteria and classification of clinical subtypes of adult T-cell leukaemia-lymphoma. A report from the Lymphoma Study Group (1984-87). *Br J Haematol.* **79**: 428-437.
- Takemoto S., M. Matsuoka, K. Yamaguchi & K. Takatsuki.** 1994. A novel diagnostic method of adult T-cell leukemia: monoclonal integration of human T-cell lymphotropic virus type I provirus DNA detected by inverse polymerase chain reaction. *Blood.* **84**: 3080-3085.
- Tangy, F.** 1996. *Molecular Biology of HTLV-I.* In: HTLV Truths and questions. Zaninovic V. (ed)., Fundación MAR, Colciencias, Cali, Colombia. pp 1.
- Terada K., S. Katamine, K. Ehuchi, R. Moriuchi, M. Kita, H. Shimada, M. Shimoyama.** 1991 **I. Yamashita, K. Iwata.** 1994 Prevalence of serum and salivary antibodies to HTLV-I in Sjogren's syndrome. *Lancet.* **344**: 1116-1119.
- Trujillo CM., M. Concha, A. Muñoz, G. Bergonzoli, C. Mora, I. Borrero, C.J. Gibbs & C. Arango.** 1992. Seroprevalence and cofactor of HTLV-I infection in Tumaco. *AIDS Res. Hum. Retroviruses* **8**:651-657.
- Uchiyama, T.** 1997. Human T cell leukemia virus type I (HTLV-I) and human diseases. *Annu Rev Immunol.* **15**:15-37.
- _____, **J. Yodoi, K. Sagawa, K. Takatsuki, H. Uchino.** 1977. Adult T-cell leukemia: clinical and hematologic features of 16 cases. *Blood.* **50**(3): 481-492.
- Vos P, R. Hogers, M. Bleeker, M. Reijans, T. Van de Lee, M. Hornes, A. Frijters, J. Pot, J. Peleman, M. Kuiper et al.** 1995. AFLP: a new technique for DNA fingerprinting. *Nucleic Acids Res.* **23**: 4407-4414.
- Watanabe T.** 1997. HTLV-I associated diseases. *Int J Hematol.* **66**: 257-278.
- Wattel E, M. Cavrois, A. Gessain, & S. Wain-Hobson.** 1996. Clonal expansion of infected cells –a way of life for HTLV-I. *J. Acquir. Immune Defic. Syndr. Hum. Retrovirol.* (suppl. 1): 92-99.
- _____, **J.P. Vartarian & S. Wain-Hobson.** 1995. Clonal expansion of HTLV-I infected cells in asymptomatic and symptomatic carriers without malignancy. *J. Virol.* **69**:2863-2868.
- World Health Organization.** 1989. Report: Scientific Group on HTLV-I infections and Associated Diseases, Kagoshima, December 10-15, Geneva, WHO.
- Yamaguchi K., T. Kiyokawa, K. Nakada, L.S. Yu, N. Asou, T. Ishii, I. Sanada, M. Seiki, M. Yoshida, E. Matutes et al.** 1988. Polyclonal integration of HTLV-I proviral DNA in lymphocytes from seropositive individuals: an intermediate state between the healthy carrier state and smoldering ATL. *Br J Haematol.* **68**:169-174.
- Yoshida M., I. Miyoshi, Y. Hinuma.** 1982. Isolation and characterization of retrovirus from cell lines of human adult

T-cell leukemia and its implication in the disease. Proc Natl Acad Sci U S A. 79: 2031-2035.

_____, **M. Osame, H. Kawai, M. Toita, N. Kuwasaki, Y. Nishida, Y. Hiraki, K. Takahashi, K. Nomura, S. Sonoda et al.** 1989. Increased replication of HTLV-I in HTLV-I associated myelopathy. Ann. Neurol. 26: 331.

Yoshima M., M. Seiki, K. Yamguchi & K Takatsuki. 1984. Monoclonal integration of human T-cell leukemia provirus in all primary tumors of adult T-cell leukemia suggests causative role of human T-cell leukemia virus in the disease. Proc Natl Acad Sci U S A. **81**(8): 2534-2537.

Zaninovic V., R. Bioj6 & P. Barreto. 1981. Paraparesia espástica del pacífico. Colombia. Médica. 12: 111-117 a.

Zaninovic V. et al. 1986. El virus HTLV-I como posible causa de la paraparesia espástica tropical del pacífico. Col. Med. 17: 2-8.

Zoubak S., J.H. Richardson, A.V. Rynditch, P. Hollsberg, D.A. Hafler, E. Boeri, A.M. Lever & G. Bernardi. 1994. Regional specificity of HTLV-I proviral integration in the human genome. Gene. 143: 155-163.

Recibido el 20 de octubre de 2005.

Aceptado para su publicación el 9 de noviembre de 2005.

NOVEDADES TAXONÓMICAS Y NOMENCLATURALES EN *CREMOSPERMA* Y *RESIA* (GESNERIACEAE) DE COLOMBIA

por

José Luis Fernández-Alonso*

Resumen

Fernández-Alonso, J.L.: Novedades taxonómicas y nomenclaturales en *Cremosperma* y *Resia* (Gesneriaceae) de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **30**(115): 171-180. 2006. ISSN 0370-3908.

Se describen tres taxones de Gesneriaceae de Colombia: *Cremosperma micropecten* de la vertiente pacífica del Valle del Cauca y *Resia umbratica* y *R. nimbicola* subsp. *nemoralis*, del centro de Colombia; se propone la combinación nueva *Resia bracteata* (Skog & de Jesus) Fern. Alonso, y se comentan las afinidades entre las especies del género *Resia*.

Palabras clave: Colombia, *Cremosperma*, Gesneriaceae, Napeantheae, *Resia*, taxonomía.

Abstract

Three new taxa of Gesneriaceae from Colombia are described: *Cremosperma micropectem* from the Pacific slopes of the Valle del Cauca Department and *Resia umbratica* and *R. nimbicola* subsp. *nemoralis*, from Central Colombia; the new combination *Resia bracteata* (Skog & de Jesus) Fern. Alonso is proposed and the affinities of the known species of *Resia* are discussed.

Key words: Colombia, *Cremosperma*, Gesneriaceae, Napeantheae, *Resia*, taxonomy.

Introducción

La familia Gesneriaceae está representada en Colombia por cerca de 32 géneros y más de 400 especies, lo que le hace el país más rico en Gesneriaceas a nivel neotropical (Kvist. *et al.*, 1998). En tiempos recientes fueron o son

objeto de estudio algunos géneros como *Pearcea* Regel., *Gasteranthus* Benth., *Kohleria* Regel., *Columnnea* L. o *Alloplectus* Martius *s.l.* en los que han resultado numerosas novedades taxonómicas para el país (Skog & Kvist, 1992, 1993, 1994; Smith, 1994; Skog & Kvist, 1996, 2000; Amaya, 2002; Clark & Skog, 2002). En otras con-

* Instituto de Ciencias Naturales, Apartado 7495, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C. Colombia. Correo electrónico: jlfernandeza@unal.edu.co

tribuciones se han tratado géneros relativamente pequeños y/o poco conocidos, con representación en territorio colombiano, como es el caso de *Cremosperma* Benth. (Kvist & Skog, 1988), *Reldia* Wiehler (Kvist & Skog, 1989), *Anethathus* Hiern ex Benth. (Skog, 1985; Fernández-Alonso, 1995a); *Resia* E. H. Moore (Skog & de Jesús, 1997) y más recientemente *Cremospermospsis* (Skog & Kvist, 2002), género constituido por dos especies endémicas de Colombia. Muchos de estos géneros carecen de una clara ubicación tribal y en algunos casos se les considera a caballo entre Beslerieae y Napeantheae (Leeuwenberg, 1958; Wiehler, 1983; Kvist & Skog, 1989; Skog & Kvist, 2002).

Tratando de aclarar la identificación de algunas colecciones recientes de *Resia* y *Cremosperma* en el Herbario Nacional Colombiano (COL), se localizaron taxones no descritos que se dan a conocer junto con algunas observaciones taxonómicas y nomenclaturales sobre el recientemente revisado género *Resia*.

Novedades en *Cremosperma*

El género *Cremosperma* Benth. Está formado por unas 25 especies de hierbas pequeñas distribuidas desde Costa Rica hasta Perú, circunscritas en su mayoría al Chocó biogeográfico; cuenta también con una importante presencia en el piedemonte amazónico con varias especies endémicas (Wiehler, 1978; Gentry, 1981; Skog, 1982; Kvist & Skog, 1988a, b; Kvist *et al.* 1998). Colombia, según el cálculo aquí estimado, es el país más rico con al menos 20 taxones, incluyendo variedades. *C. filicifolium* Kvist & L. Skog (descrita del Pacífico caucano), y la especie descrita a continuación son las más peculiares del género por la forma, tamaño y disposición dística de sus hojas.

Cremosperma micropecten Fern. Alonso **sp. nov.**

Fig. 1 A-C.

Tipo: COLOMBIA. **Valle del Cauca.** Bajo Calima, Buenaventura, concesión Pulpapel, Carretera a La Gasolina, 3° 55' N, 77° W, 100 m, bosque primario, fl, 23 abr 1987, *M. Monsalve B. 1449* (Holotipo CUV; isotipo MO?).

Ab omnibus speciebus generis differt planta epiphítica, foliis dorsiventraliter dispositis, linearis (30-45 mm x 1,5-2,5 mm), margine disperse ciliato-pilosis; pedunculo inflorescentiae filiforme, 15-20 mm x 1 mm; calyce 3-4 mm longis, extus dense piloso-setaceus, corolla alba, 5,5-6 mm longa, disperse pilosa.

Etimología: El nombre de la especie hace referencia a la disposición abanicada de las hojas lineares en un solo plano, a modo de peineta.

Hierba epífita que crece sobre los troncos, de hasta 10-15 cm de longitud. Tallos rojizos, agrupados de a 2-5, patentes o ascendentes, cilíndricos, gráciles, de 1,5-2 mm de diámetro, no ramificados, densamente cubiertos de protuberancias o pliegues tuberculados y de pelos acostados, blancos, cintiformes, agudos en el ápice. Hojas densamente dispuestas, oscuramente opuestas y dispuestas dísticamente, agrupadas en abanico en el tercio distal, las de cada par ligeramente desiguales; sésiles o adelgazadas gradualmente en corto pecíolo, de 1-2 mm, éste recubierto de pelos blancos acostados; láminas lineares, de 30-45 x 1,5-2,5 mm, levemente adelgazadas en el tercio distal, margen entera o muy dispersamente crenulada en el tercio distal, con indumento de pelos blancos cintiformes agudos, acostados, sobre el nervio medio y sobre los márgenes en el envés y dispersa y laxamente distribuidos por la haz. Inflorescencias terminales o subterminales, iguales o más cortas que las hojas; pedúnculo filiforme de 15-20 mm x 1 mm de grosor, con indumento de pelos dispersos cintiformes, con 3-5 flores agrupadas en el extremo, en distinto estado de maduración; pedicelo floral de 0,5-2 mm de longitud y c. 0,7 mm de grosor, recubierto por denso indumento blanco, cintiforme, acostado; botones florales blancos con tinte morado; cáliz ligeramente acampanado, de 3-4 mm de longitud, rasgado en la mitad distal, con lóbulos triangular-agudos, de c. 1,5 mm de longitud, hirsuto externamente, cubierto de grandes pelos blancos, acostados, agudos; corola blanca, tubular-bilabiada, de 5,5-6 mm de longitud, tubo de c. 4 mm de longitud y 1,5 mm de anchura en la boca, lóbulos de 1,5 mm de longitud, externamente con pequeños pelos de aspecto papiloso y pelos blancos agudos, dispersos en el tercio distal; interiormente glabra a excepción de la garganta que presenta indumento papiloso; estambres didínamos, filamentos de c. 3,5 mm de longitud, adnados en su mayor parte al tubo de la corola, glabros, con anteras amarillentas, coherentes por sus ápices, reniformes, de c. 0,5 mm de diámetro; ovario ovoide-cónico, glabro; estilo de 3,5 mm de longitud, glabro, estigma capitado. Frutos y semillas no vistos.

Hábitat y distribución: Solo conocida de la colección y localidad tipo, en la vertiente pacífica de Colombia, en Buenaventura (Bajo Calima, Valle del Cauca), hacia los 100 m de altitud en bosque pluvial tropical. Crece como epífita en la base de los troncos, en ambiente sombrío, en bosques que se asientan sobre suelos deficientes en varios nutrientes (P, Ca, K, Mg, etc.) y con alta saturación.



Figura 1. A-C. *Cremosperma micropectem* Fern. Alonso. **A.** Hábito. **B.** Detalle de las hojas **C.** Detalle de la inflorescencia y botón floral (A partir del holótipo *M. Monsalve 1449*). **D.** *Cremosperma pusillum*. Hábito. (a partir de *J.R.I. Wood 5371*).

ción de aluminio. Aparentemente es un especie muy rara y local, ya que no se ha vuelto a localizar en la zona pacífica del departamento del Valle, desde que se realizó la colección típica hace ya casi 20 años. Por otra parte, la localidad de recolección se encuentra fuertemente modificada en la actualidad por la extracción de madera, lo que plantea serias dudas sobre la conservación y existencia actual de esta especie.

Observaciones taxonómicas: Especie muy característica por sus hojas lineares de menos de 3 mm de ancho, que la separan claramente del resto de las especies del género. Por el indumento notorio de pelos blancos, cintiformes, y la disposición de las hojas e inflorescencia, guarda alguna semejanza con *Cremosperma muscicola* Kvist & L. Skog del Pacífico de Colombia y límites con Ecuador y con *C. pusillum* C. Morton conocida de Ecuador y escasamente de Colombia.

Cremosperma pusillum C. Morton, J. Wash. Acad. Sci. 25(6): 287. 1935. Fig. 1D

Especie característica por presentar pequeñas hojas ternadas (o de a cuatro) y subiguales, que fue descrita a partir de una colección de André, de procedencia imprecisa: "Colombia o Ecuador, E. André 4572, Colombia, Tambo de Savanilla -Nariño?- 18 dic 1976" (K, NY). Con posterioridad se ha citado del sur de Ecuador (Loja, Zamora-Chinchi), pero no se conocían citas recientes de plantas provenientes de territorio colombiano con excepción de una antigua (*Kalbreyer 1470*), del departamento de Antioquia depositada en el herbario K (**Morton**, 1935, 1944). A continuación se indican algunas colecciones asignables a *C. pusillum* que ratifican la presencia de esta planta en territorio colombiano, donde presenta una distribución discontinua en el Magdalena Medio y en el piedemonte amazónico.

Material examinado: COLOMBIA. **Antioquia.** Mpio. de Envigado, margen izquierda del río La Miel, fuente del Higuerón, bosque húmedo montano bajo, 2350 m, 18 abr 1996, *M. Correa & al.* 481(COL-430198, JAUM); Mpio. de Cocorná, vereda La Roca (Autopista Medellín-Bogotá, Km 62), 2000 m, 3 may 1980, *G. Galeano & R. Bernal 184* (COL-332278); 4 km al Este de Santuario, bosque nublado, 2000 m, 25 mar 1986, *J.R.I. Wood 5371* (COL-375145, FMB). **Cauca.** Mpio. de Argelia, Quebrada La Soledad, 2320 m, mar 1995, *M. L. Becking & R. Sánchez 2324* (COL-365193).

Novedades taxonómicas y nomenclaturales en *Resia*

Entre las recolecciones llegadas recientemente al Herbario Nacional Colombiano, se estudió una muestra del género

Resia, proveniente de la región de Prado, Tolima, que corresponde a una nueva especie fácilmente reconocible por sus inflorescencias paucifloras y por presentar las flores de mayor tamaño conocidas hasta la fecha (**Moore**, 1962; **Leeuwenberg**, 1968; **Skog & de Jesús**, 1997). Se proponen asimismo una nueva subespecie y una nueva combinación, con lo que se trata de caracterizar, de modo más preciso, algunas plantas presentes en territorio colombiano que venían identificándose en los herbarios bajo el nombre *R. nimbicola*. Según la presente propuesta, el género *Resia* comprende cuatro especies y una subespecie, siendo cuatro de los cinco taxones, propios de Colombia. No obstante, la presencia de dos de ellas en el piedemonte amazónico de Putumayo-Caquetá sugiere que alguna pueda alcanzar en su distribución a Ecuador, como ocurre en otros géneros como *Calceolaria* L. (Scrophulariaceae) o *Columnea* L., *Heppiella* Regel o *Pearcea* Regel (Gesneriaceae), que presentan especies con distribución continua en el piedemonte amazónico de Colombia-Ecuador (**Molau**, 1988; **Fernández-Alonso**, 1995b; **Kvist & Skog**, 1993, 1996).

Clave para las especies de *Resia*

1. Inflorescencias cimosas ramificadas
..... (3- *R. nimbicola*)...2
- 1' Inflorescencias en umbela simple 3
2. Margen de la hoja con dientes notorios (de al menos 1 mm) e irregularmente distribuidos; sépalos cortos de 4-5,5 mm, generalmente no apiculados o con apículo de menos de 1,5 mm, estilo glabrescente y cápsula glabra 3a-*R. nimbicola* subsp. *nemoralis*
- 2' Margen de la hoja subentera o con dientes poco salientes (de menos de 1 mm), uniformemente distribuidos; sépalos de mas de 5,5 mm con apículo de al menos 2 mm, estilo y cápsula pilosos
..... 3b-*R. nimbicola* subsp. *nimbicola*
3. Inflorescencias laxas, paucifloras (4-5 flores), corola de (15)20-21 mm de longitud y (5)7-8 mm de anchura en la garganta; estilo y cápsula pilosos
..... 4- *R. umbratica*
- 3' Inflorescencias congestas, multifloras (generalmente con más de una docena de flores), corola de 9-11 mm de longitud y 2,5-3,5 mm de anchura en la garganta, estilo y cápsula glabros 4
4. Hojas membranosas con nerviación terciaria no resaltada en el envés; inflorescencia sin brácteas
..... 2- *R. ichthyoides*

4' Hojas mas o menos cartáceas, frecuentemente bulladas, con nerviación terciaria resaltada en el envés, inflorescencia con brácteas ovadas de 4-22 mm de longitud 1- *R. bracteata*

1. *Resia bracteata* (L. Skog & de Jesús) Fern. Alonso *comb. nov.*

Basónimo: *R. ichthyoides* subsp. *bracteata* L.E. Skog & de Jesus, Biollania 6: 520-521, fig. 1. 1997. Tipo: COLOMBIA. **Santander**. Mpio. De Charalá, Corregimiento de Virolín, cerca del río Oibita, 25 jun 1993, X. Londoño & L.P. Kvist 812 (Holótipo, COL-418283; Isótipos HUA, MO, US).

Se propone para la subespecie *bracteata* de *R. ichthyoides*, descrita recientemente de Colombia, el rango de especie, por considerar, de acuerdo con **Wiehler** (1983), la presencia de brácteas conspicuas en la inflorescencia un carácter muy relevante en la separación de géneros y tribus dentro de la familia. Existen además diferencias en la consistencia y nerviación de la hoja, que permiten separar a estas dos especies como aparecen en la clave.

Material examinado: COLOMBIA. **Cundinamarca**. NE de Gachalá, Las Cascadas, cara sur del río Guavio, 1950 m, 29 oct 1944, *M. L. Grant 10525* (COL 305824). **Putumayo**, al E del Mpio. de Mocoa, Río Afán, 700 m, 11 dic 1986, *B. Hammel & al. 15.938* (MO); ibídem, El Churumbelo, Vereda El Zarzal, costado derecho de la Quebrada Dantayaco, 1° 6' N, 76° 36' W, 840 m, 13 jun 2002, *B. Ramírez 15524* (COL-490259). **Santander**. Mpio. de Suaita, Corregim. San José de Suaita, La Meseta, c. de la Quebrada La Laja, 1700-1900 m, rupícola, 29 jul 2001, *J. Betancur & al. 9319* (COL); ibídem, Vereda La Meseta, bosque perturbado, 1780-1800 m, 7 abr. 2003, *J. Betancur & al. 10136* (COL-486521); Bosque de La Meseta, 1700-1800, sobre roca, 28 jul 2001, *C.I. Orozco 3441* (COL).

Hábitat y distribución. Hasta donde se conoce, es endémica de Colombia donde crece entre los 800 y 2000 m, en taludes rocosos y húmedos, tanto en la vertiente amazónica de la Cordillera Oriental, como en su vertiente occidental al río Magdalena. Se trata de una especie eminentemente rupícola y umbratícola.

Afinidades taxonómicas. Al igual que *R. ichthyoides* y *R. nimbicola* subsp. *nemoralis*, presenta hojas irregularmente dentadas y estilo y cápsula glabras. De la segunda se separa claramente por la presencia de inflorescencias cimosas ramificadas y de la primera por ausencia de brácteas en la inflorescencia. Esta especie posee hojas más o menos bulladas en algunos individuos, con margen

muy fina e irregularmente dentada. La floración es abundante, presentándose varias inflorescencias simultáneas en antesis en un individuo, a diferencia de otras especies en las que el número de inflorescencias desarrolladas suele ser escaso (2-4).

2. *Resia ichthyoides* Leeuwenb., Acta Bot. Neerl. 17: 476. 1968.

Reconocible por la presencia de inflorescencias umbeliformes multifloras desprovistas de brácteas y además por presentar estilo y cápsula glabra, estriada longitudinalmente y cubierta de papilas sésiles. **Leeuwenberg** (1968), al describir esta especie, habla en el protólogo de inflorescencias casi umbeladas, con ramas cortas u obsoletas. Según lo observado en el espécimen revisado, las flores en disposición umbeliforme parten secuencialmente de un eje alargado (de c. 1 cm), sin ser estrictamente umbelas. Esto representaría una situación de transición (grado de reducción) entre las típicas inflorescencias cimosas y ramosas de *R. nimbicola* y las umbeliformes de *R. bracteata*, siendo el extremo de reducción en esta serie *R. umbratica*, con sus umbelas paucifloras.

Hábitat y distribución. Hasta donde se conoce *R. ichthyoides* es endémica de Venezuela, de la franja subandina de los estados de Carabobo y Yaracuy, donde crece en ambientes sombreados, en la zona de influencia de quebradas, sobre esquistos micáceos (**Skog & de Jesus**, 1997).

Material examinado: VENEZUELA. **Yaracuy**. Límite entre los Distritos Nirgua-San Felipe, Cerro La Chapa, 1200-1300 m, bosque nublado, 21 oct 1982 fl, *G. Davidse & al. 20849* (COL-443563).

3. *Resia nimbicola* H. E. Moore, Bot. Mus. Leaflet. **20**(3): 88. 1962.

Tipo: COLOMBIA. **Meta**. Sierra de la Macarena (extremo nordeste), Macizo Renjifo, 6-20 ene 1951, *J.M. Idrobo & R.E. Schultes 1082* (Isotipus COL, US).

Con respecto a las plantas típicas del piedemonte Orinoco-amazónico de la Cordillera Oriental, las muestras estudiadas del otro flanco de la Cordillera, en la vertiente del Magdalena del departamento de Santander, muestran algunas diferencias en la margen de la hoja, la forma y tamaño de los sépalos y el indumento del estilo y el fruto, diferencias que en nuestro concepto ameritan su reconocimiento como entidad taxonómica independiente. Al haber encontrado cierta coherencia en el aislamiento geográfico de estas dos entidades, hemos optado por el rango subespecífico para estas plantas.

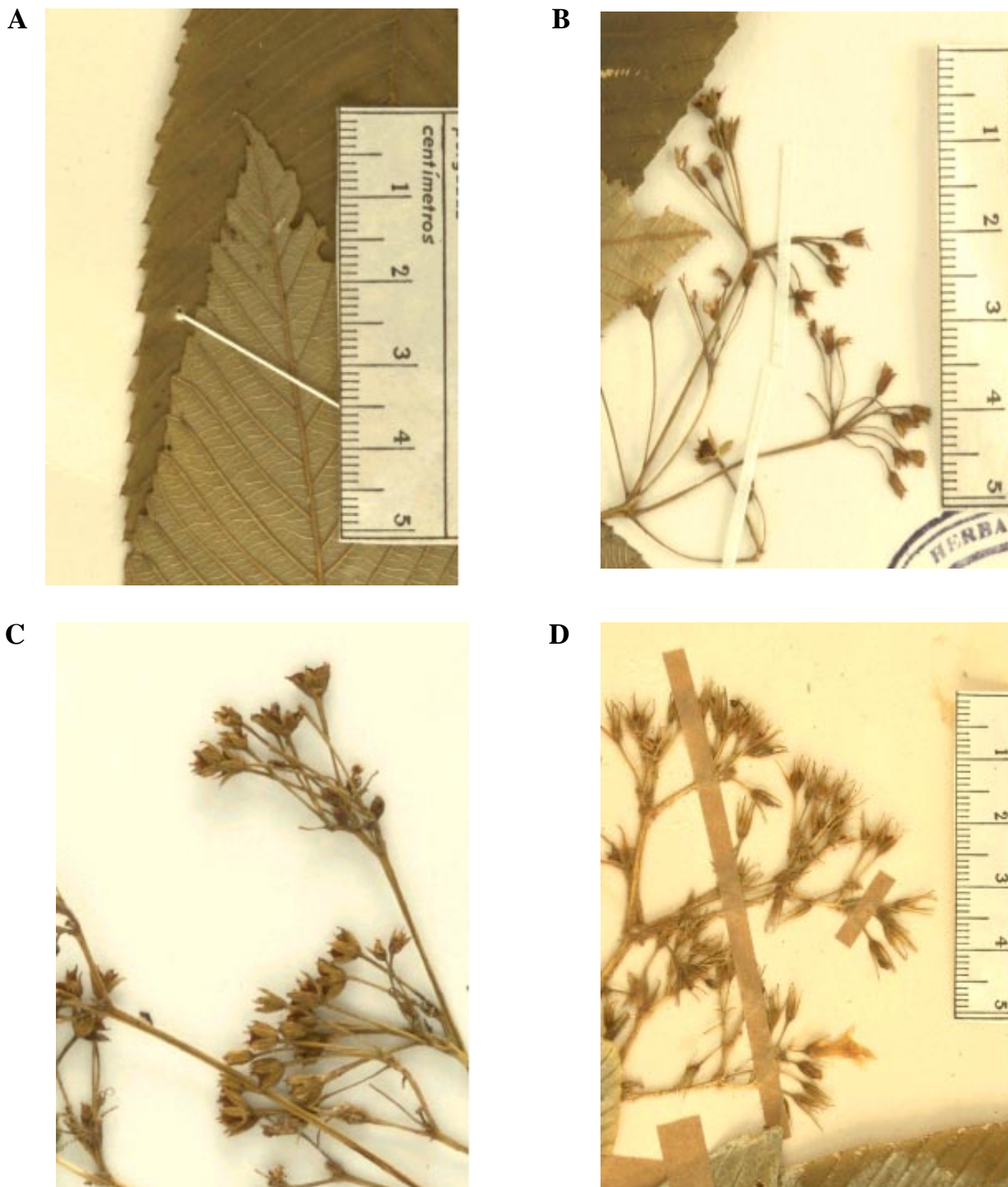


Figura 2. A-C. *Resia nimicola* subsp. *nemoralis* Fern. Alonso. **A.** Detalle del margen de la hoja. **B.** Detalle de una inflorescencia en la antesis. **C.** Detalle de la inflorescencia con frutos (A y D a partir del holótipo *S. Díaz* 3396; B- a partir de *G. Lozano* 3776). **D.** *Resia nimicola* subsp. *nimicola* Moore. (a partir de *J. Cuatrecasas* 8849).

**3a. *Resia nimbicola* subsp. *nemoralis* Fern. Alonso
subsp. nov. Fig. 2A-C**

Tipo: COLOMBIA. **Santander.** Mpio. de Charalá, Corregimiento de Virolín, 1850 m, sotobosque, 13 may 1982, S. Díaz P. 3396 (Holotypus COL -2 pliegos-; 1/2 COL- 233916, fl; 2/2 COL- 233915, fr).

A subspeciebus typicae in margine foliis dentibus inaequalibus, 1 mm plusve altus, sepalis breviores (4-4,5 mm longis), exapiculatus vel apiculo 1,5 mm minusve, stylo glabrescente et capsula glabra differt.

Etimología. El nombre de la subespecie hace referencia a hábitat de esta planta en el sotobosque.

Hierbas de hasta 50-60 cm, con tallos acostadas o ascendentes de hasta 35-40 cm de longitud y 7-11 mm de diámetro. Hojas agrupadas en el ápice del tronco, discoloras (láminas con haz verde oscuro y envés verde pálido); brevemente pecioladas, de estrechamente obovadas a estrechamente oblanceoladas, de hasta 30-35 x 5-7,5 cm; margen de la hoja con dientes notorios (salientes al menos 1 mm con respecto a la margen) e irregularmente distribuidos; nerviación terciaria y cuaternaria resaltada en el envés. Pedúnculo de la inflorescencia verde, de 12-15 cm de longitud, pedicelo floral verde pálido, de 5-15 mm de longitud, con indumento seríceo corto y a veces también glandular; sépalos verdes, oval-lanceolados, a veces ligeramente apiculados, cortos, de (3)4-5,5 mm, a veces con apículo de hasta 1,5 mm, con 3-5 nervios inconspicuos o poco conspicuos en la antesis y resaltados en el cáliz persistente, subglabros o con escasos pelos glandulares y no glandulares; corola blanca, con indumento muy corto, seríceo acostado en la cara externa y con pelos glandulares septados a nivel de la garganta en la cara interna; estilo glabrescente, papiloso; cápsula glabra, comprimida lateralmente y ligeramente depresa en el ápice, con venas longitudinales notorias, a veces anastomosadas, en la cara externa nítida y papilosa. Semillas amarillo-marrón, nítidas, de c. 0,3 mm, estrechamente oval-elípticas, apiculadas, testa de aspecto estriado-reticulada, con la ornamentación poco resaltada.

Hábitat y distribución. Crece en ambientes sombreados del sotobosque, generalmente en relieves encajonados, cerca de quebradas, entre los 1700 y 2000 m en la vertiente occidental de la Cordillera Oriental de Colombia, en el Departamento de Santander. En esta misma región se encuentra *R. bracteata*, que aparentemente presenta especificidad diferente en cuanto a su microhábitat, al encontrarse asociada más a taludes y paredes rocosas que al suelo del sotobosque.

Otro material examinado: COLOMBIA. **Santander.** Mpio. de Charalá; Vía Cañaverales- Charalá, vereda El Triunfo, 26 jun 1993, X. Londoño & P.L. Kvist 814 (COL-414624); ibidem, Corregim. de Virolín, en sotobosque, 1850 m, 13 may 1982, fl. G. Lozano 3776 (COL-263615, 263616, 451404); Mpio. de El Encino, Vereda Rionegro, Reserv. Biol. Cachalú, 1800-1900 m, fl, fr, 31 ene 2003, N.R. Salinas & al. 153 (COL- 489041).

3b. *Resia nimbicola* subsp. *nimbicola* Fig. 2D

Plantas con hojas con margen uniformemente dentada, dientes distantes y muy poco resaltados; inflorescencias típicamente cimosas, ramificadas, desprovistas de brácteas, con pedúnculos y pedicelos provistos de largo indumento pluricelular, cintiforme, marrón; flores con sépalos largamente apiculados, generalmente con el mismo indumento del pedicelo, a veces de apariencia largamente ciliada en la parte distal (apículo); estilo con pelos cortos y estigma notoriamente capitado; cápsula con abundantes pelos blancos, agudos, acostados; semillas nítidas, marrones, anchamente elípticas, escasamente apiculadas, de c. 0,3-0,5 mm de longitud, superficie de la testa granular-estriada o ligeramente muricada.

Hábitat y distribución. Especie aparentemente restringida a paredes rocosas y taludes sombríos, entre los 400 y 2000 m, principalmente en la vertiente oriental de la Cordillera Oriental de Colombia, en los Departamento de Boyacá, Caquetá, Cundinamarca y Meta.

Material representativo examinado: COLOMBIA. **Meta.** Sierra de La Macarena, El Tablazo, 1000-1200 m, 27 may 1973, E. Forero & al. 802 (COL); Sierra de La Macarena (extremo nordeste), Macizo Renjifo, 1300-1900 m, 6-20 ene 1951 J.M. Idrobo & R.E. Schultes 1059 (COL). **Caquetá.** Mpio. de Florencia, Quebrada de las Perdices, entre peñas, 400 m, 20 mar 1940, J. Cuatrecasas 8849 (COL); ibídem, E. Perez-Arbeláez 737 (COL);.

4. *Resia umbratica* Fern. Alonso sp. nov. Fig. 3A-D

Tipo: COLOMBIA. **Tolima.** Cuenca del río Prado, subcuenca del Cuindeblanco, Mpio. de Cunday, Vereda Alto Torres, 3° 48' N, 74° 41' W, 1600 m, 18 ago 2004, fl, fr, A. Nieto 86 (Holotypus COL-511253; isotypus TOLI).

Ab omnibus speciebus generis differt inflorescentia umbellata, ebracteata, pauciflora (4-5 floris), corolla lutea vel aurata (15)20-21 mm longa x (5)7-8 mm lata ad fauce tubum, anguste campanulata, lobiis integris subaequalibus, staminæ filamentis geniculatis et antheris libris vel quisque dua, obscure cohaerentibus.

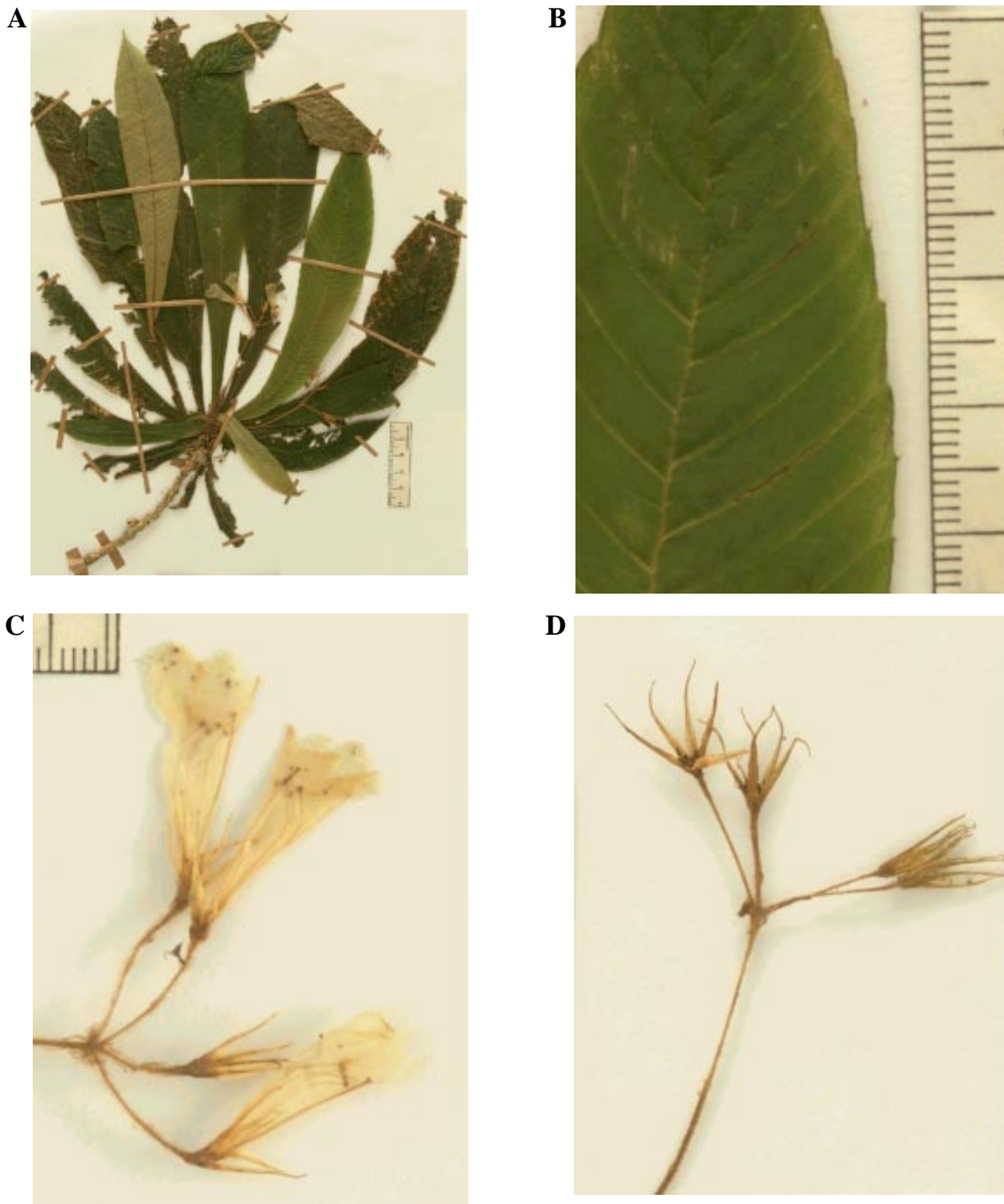


Figura 3. *Resia umbratica* Fern. Alonso. **A.** Hábito. **B.** Detalle del margen de la hoja. **C.** Detalle de una inflorescencia en la antesis. **D.** Detalle de la inflorescencia con frutos. (a partir del holótipo: A. Nieto 86).

Etimología. El epíteto específico, hace referencia a los ambientes sombreados donde crece esta especie.

Subarbusto terrestre, perenne, con tallo simple, erecto o acostado-ascendente, de hasta 30 cm de longitud y 9-11 mm de diámetro, rugoso, con hojas subopuestas, densamente agrupadas en roseta en la parte distal, con indumento tomentoso-lanoso en las partes apicales; láminas subsésiles, membranosas, estrechamente oblanceoladas, ligeramente arqueado-falcadas en la base, de (15)20-28 cm de longitud y 3,5-4,5 cm de anchura en la parte más ancha (tercio superior), apiculado-caudadas en el ápice (apículo de 0,5-1 cm), base gradualmente adelgazada en peciolo, margen finamente dentada, con dientes muy poco pronunciados (de menos de 1 mm de alto) y regularmente distribuidos, venación pinnada con (30)35-60 nervios a cada lado, levemente curvados, impresos por la haz y resaltados en el envés. Inflorescencias axilares, umbeliformes, ebracteadas, con pedúnculos gráciles, más cortos que las hojas, de 5-6(10) cm de longitud y c. 1 mm de grosor, con indumento lanoso-ferrugíneo, brillante, con 4(5) flores largamente pediceladas, pedicelo de 10-16(22) mm, con indumento lanoso-ferrugíneo; cáliz con sépalos verdes, subiguales, estrechamente lanceolados, acuminado-caudados, de (7)9-10 mm en la antesis y hasta 11-12 mm acompañando al fruto, con 3-5 nervios longitudinales resaltados y generalmente con indumento corto, marrón, acostado; corola amarilla o anaranjada, zigomorfa, estrechamente acampanada, de (15)20-21 mm x (5)7-8 mm en boca del tubo, en la parte distal; con tubo de 15-16 mm de longitud y lóbulos redondeados, de 3-4 mm de longitud y 3-5 mm de anchura; con indumento muy fino de pelos glandulares y no glandulares en la cara externa; 4 estambres con filamentos libres hasta cerca de la base, didinamos, de 11-13 mm de longitud, geniculados en la parte distal, anteras reniformes, oscuramente coherentes de a dos o totalmente libres; ovario súpero elipsoide, lateralmente comprimido, estilo de 15-16 mm, piloso, estigma subcapitado, bilobado. Fruto cápsula cortamente ovada, comprimida lateralmente, con reborde marginal y con proyección apical persistente del estilo, de 2,5 x 2 mm, con indumento piloso de pelos blancos acostados, y glándulas sésiles brillantes; semillas marrón amarillentas, nítidas, ovadas, de 0,3 mm de longitud, largamente apiculadas, finamente estriado-reticuladas.

Hábitat y distribución. Se conoce sólo de dos regiones aisladas del Centro-Norte de Colombia, en las cuencas del Magdalena (Tolima) y del Cauca (Antioquia), en la franja subandina, entre los 1600 y 2100 m, donde crece en ambientes umbríos, en taludes rocosos y húmedos.

Afinidades taxonómicas. *R. umbratica* presenta indudable afinidad con *R. nimbicola*, por su margen de la hoja oscura o muy levemente dentada y por las dimensiones e indumento del pedicelo y cáliz floral. Sin embargo las inflorescencias umbeladas simples y las dimensiones de la corola separan con claridad a estas plantas. *R. umbratica* también se aparta del resto de los taxones conocidos por sus inflorescencias umbeladas de 4-5 flores y desprovistas de brácteas.

Observaciones:

1. Consideramos asignable a esta especie una recolección procedente de Yarumal, en la vertiente al río Cauca del departamento de Antioquia, que se diferencia de las plantas típicas por presentar hojas con indumento disperso de pelos largos acostados, en haz y envés, más conspicuo que en las plantas típicas del Tolima y por presentar cáliz y corola ligeramente más pequeños (corola anaranjada de 14-15 mm de longitud y 4-6 mm de anchura en la garganta; y con dos lóbulos anteriores (dorsales) de la corola claramente más reducidos que los otros tres).

2. Aparentemente una colección citada por Moore en el protólogo –proveniente de Cundinamarca (Sumapaz), no lejos de la localidad tipo de esta especie–, guarda muchas semejanzas con la que aquí se describe. Algunos de los caracteres comentados por Moore, como la longitud de los pedicelos florales y de los sépalos son coincidentes, y la separan de la típica *R. nimbicola*.

3. Las corolas 2-3 veces más largas que el cáliz y los lóbulos de la corola levemente desiguales de *R. umbratica* recuerdan en cierto modo al género *Tylopsacas* Leewenb., de la formación Guyana (Leeuwenberg, 1958; Feuillet & Steyermark, 1999). No obstante la presencia de giba basal en la corola e inflorescencias paniculadas separan con claridad a tal género de la planta que aquí se describe.

Paratipos: COLOMBIA. Antioquia. Mpio. De Yarumal, Alto de Ventanas, vía a El Cedro, ca. 6 km del cruce con la vía Yarumal-Puerto Valdivia, 7° 10' N, 75° 28' N, c. 2100 m, 8 nov 1987, J.L. Luteyn & O. Maruleda 11884 (COL-403329, HUA, MO).

Agradecimientos

Mi agradecimiento a la Universidad Nacional de Colombia y al Instituto de Ciencias Naturales por las facilidades dadas para el desarrollo del presente trabajo, y a los curadores de los herbarios COL y CUVC, por facilitar al consulta y los préstamos de especímenes. También agradezco al personal de la biblioteca Armando Dugand la habitual colaboración.

Bibliografía

- Amaya-Márquez, M.** 2002. Una nueva especie de *Columnnea* Sección *Collandra* (Gesneriaceae). *Caldasia* **24**(2): 225-228.
- Clark, J.L. & L.E. Skog** 2002. Novae Gesneriaceae Neotropicarum VIII: *Alloplectus grandicalyx*, a new species from Colombia and Ecuador. *Novon* **12**: 173-178.
- Fernández-Alonso, J.L.** 1995a. Notas sobre el género *Anethanthus* Hiern ex Benth. (Gesneriaceae) en Colombia. *Caldasia* **17**: 183-188.
- _____. 1995b. El elemento endémico en la flora vascular de Nariño-Putumayo y sus implicaciones para la conservación. pp. 32-44, en: Franco, P., Betancur, J. & J.L. Fernández "Comparación de la diversidad florística entre dos zonas de las vertientes amazónica y pacífica de Colombia". Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. pp. 1-191 (informe final Colciencias, inédito).
- Feuillet, C. & J.A. Steyermark** 1999. Gesneriaceae, pp. 542-573, en: P.E. Berry, K. Yatskievych & B.K. Holst (eds.) Flora of the Venezuelan Guayana **5** Eriocaulaceae-Lentibulariaceae. Missouri Bot. Garden. St. Louis.
- Gentry, A. H.** 1981. Phylogeographic patterns as evidence for a Chocó refuge. In: Prance, G.T. (ed.), Biological diversification in the tropics. Columbia University Press, New York, pp. 112-136.
- Kvist, L.P. & L.E. Skog.** 1988a. *Columnnea incredibilis* and *Cremosperma filicifolium* -two remarkable new Gesneriaceae from western Colombia. *Nord. J. Bot.* **8**(3): 253-257.
- _____. & _____. 1988b. The genus *Cremosperma* (Gesneriaceae) in Ecuador. *Nord. J. Bot.* **8**(3): 259-269.
- _____. & _____. 1989. Revision of *Reldia* (Gesneriaceae). *Nord. J. Bot.* **8**(6): 601-611.
- _____. & _____. 1992. Revision of *Kohleria* (Gesneriaceae). *Smithsonian Contr. Bot.* **79**: 1-83.
- _____. & _____. 1993. The genus *Columnnea* (Gesneriaceae) in Ecuador. *Allertonia* **6**(5): 327-400.
- _____. & _____. 1994. Novae Gesneriaceae neotropicarum VI: five new Gesneriaceae from northwestern South America. *Brittonia* **46**(4): 317-330.
- _____. & _____. 1996. Revision of *Pearcea* (Gesneriaceae). *Smithsonian Contr. Bot.* **84**: 1-47.
- _____. & _____. & M Amaya-Marquez 1998. Los géneros de gesneriáceas de Colombia. *Caldasia* **20**(1): 12-28.
- Leeuwenberg, A.J.** 1958. The Gesneriaceae of Guiana. A critical revisión with notes on species from adjacent regions. *Acta Bot. Neerl.* **7**: 291-444.
- _____. 1968. Notes on american Gesneriaceae IV. A new species of *Resia* H.E.Moore. *Acta Bot. Neerl.* **17**(6): 475-477.
- Moore, H.E.Jr.** 1962. *Resia* -a new genus of Gesneriaceae. *Bot. Mus. Leafl.* **20**(3): 85-92.
- Molau, U.** 1988. Scrophulariaceae Part I. Calceolarieae. *Flora Neotropica* **47**. New York Bot. Garden. New York.
- Morton, C.V.** 1935. The genus *Cremosperma* -J. Wash. Acad. Sci. **25**: 283-291.
- _____. 1944. Studies of tropical American plants: A revisión of *Cremosperma*. -*Contr. U.S. Natl. Herb.* **29**: 31-35.
- Skog, L.E.** 1982. New Gesneriaceae from Peru and Ecuador. *Selbyana* **7**(1): 94-99.
- _____. & **F. F. de Jesus** 1997. A Review of *Resia* (Gesneriaceae). *Biollania Edición Espec.* **6**: 515-525.
- _____. & **L.P. Kvist** 2000. Revision of *Gasteranthus* (Gesneriaceae). *Syst. Bot. Monogr.* **59**: 1-118.
- _____. & _____. 2002. Novae Gesneriaceae Neotropicarum IX: *Cremospermopsis*, a new genus from Colombia. *Novon* **12**: 262-269.
- Smith, J. F.** 1994. Systematics of *Columnnea* section *Pentadenia* and section *Stygnanthe* (Gesneriaceae). *Syst. Bot. Monogr.* **44**: 1-89.
- Wiehler, H.** 1978. Miscellaneous transfers and new species of neotropical Gesneriaceae. *Selbyana* **5**(1): 61-93.
- _____. 1983. A synopsis of neotropical Gesneriaceae. *Selbyana* **6**: 1-129.

Recibido el 16 de noviembre de 2005.

Aceptado para su publicación el 10 de abril de 2006.

ARISTOLOCHIA GRANDIFLORA SW. (ARISTOLOCHIACEAE): DESARROLLO Y MORFOLOGÍA DE LA FLOR MÁS LARGA DEL MUNDO

por

María Angélica Bello^{1,3}, Hamleth Valois-Cuesta² & Favio González¹

Resumen

Bello, M.A., Valois-Cuesta, H. & F. González: *Aristolochia grandiflora* Sw. (Aristolochiaceae): Desarrollo y morfología de la flor más larga del mundo. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **30**(115): 181-194. 2006. ISSN 0370-3908.

Aristolochia grandiflora Sw. posee las flores más largas del mundo. La distribución de esta especie incluye México, Centro América, Cuba, Jamaica, Colombia, Trinidad y Ecuador, con algunos registros posiblemente procedentes de poblaciones cultivadas o naturalizadas en St. Thomas, Guadalupe y Martinica. Aunque es una especie bien conocida en cultivo, debido a la morfología floral tan extraña y conspicua, es poco conocida en su estado nativo. Además de las dimensiones extremas de la flor, la morfología del perianto es atípica con respecto a las demás especies neotropicales del subgénero *Aristolochia*, en cuanto a la zigomorfía lateral (i.e. la que modifica el perfil del perianto) y frontal (i. e. la que afecta únicamente al limbo floral), y el desarrollo de dos de las estructuras internas más especializadas, la siringe y el anillo. Se describe el desarrollo floral, con énfasis en el perianto, y se documenta el que sin duda, es el ejemplar con la mayor longitud del perianto hasta ahora conocido en estado silvestre. Finalmente, se discuten las posibles relaciones filogenéticas de la especie.

Palabras clave: *Aristolochia grandiflora*, Aristolochiaceae, desarrollo floral, Chocó, Neotrópico.

Abstract

Aristolochia grandiflora Sw. has the longest flowers on Earth. The distribution of this species includes Mexico, Central America, Cuba, Jamaica, Colombia, Trinidad, and Ecuador; some collections from St. Thomas, Guadalupe. and Martinica could correspond to cultivated and naturalized

¹ Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, A.A. 7495, Bogotá.

² Programa de Biología con énfasis en Recursos Naturales, Herbario Chocó, Grupo de Investigación en Biosistemática, Universidad Tecnológica del Chocó, A.A. 292, Quibdó, Chocó, Colombia.

³ Jodrell Laboratory, Royal Botanic Gardens, Kew, Richmond TW9 3AB, UK.

populations. Although this species is well known in cultivation because of its bizarre floral morphology, it is less known in the wild. Besides the large size of its flowers, the morphology of the perianth is different from that found in the other neotropical species of subgenus *Aristolochia*; these differences affect both the lateral zygomorphy (i.e. an unequal growth along the floral tube) and the frontal (i. e. an unequal growth of the limb of the perianth) symmetry; furthermore, the flower of *A. grandiflora* develops two inner structures, the *syrix*, and the *annulus*. We describe the floral development, especially that of the of the perianth, along with the record that is, without doubts, the longest known flower in the wild. Finally, we discuss the phylogenetic relationships of the species.

Key words: *Aristolochia grandiflora*, Aristolochiaceae, Floral development, Neotropics.

Introducción

Aristolochia grandiflora Sw. (Aristolochiaceae) es un bejuco con hojas simples, alternas, cordadas, y flores solitarias, muy grandes, con un apéndice cintiforme en el extremo distal del perianto (Figs. 1, 2). Una de las características más sobresalientes de la especie es la gran dimensión de las flores; el limbo floral puede llegar a medir hasta 35 x 31, sin incluir una cauda que puede sobrepasar los 150 cm de longitud. Con estas dimensiones, es sin duda, la flor más larga del mundo.

Aristolochia grandiflora se encuentra distribuida en México, Centro América, Cuba, Jamaica (su localidad tipo), Colombia, Trinidad y Ecuador, en alturas por debajo de 1000 m (González, 1990, 1994). Además, existen registros en otras localidades de Las Antillas (St. Thomas, Guadalupe y Martinica), posiblemente procedentes de poblaciones cultivadas o naturalizadas. Como especie exótica, se cultiva en muchos otros países. No obstante, en estado silvestre es una especie poco común y no bien estudiada (cf. Acevedo-Rodríguez, 2003). En Colombia, ha sido recolectada en bosques primarios y secundarios entre 50 y 850 msnm, en los departamentos de Antioquia, Córdoba, Chocó, más un registro de mediados del siglo XX en Cundinamarca. Una colección reciente efectuada por uno de los autores (HV) en el municipio de Alto Baudó (Chocó) sobrepasa las dimensiones florales hasta ahora conocidas, ya que el apéndice alcanza 220 cm de longitud (Fig. 1 A, B). Quizás debido a las dimensiones y cambios tan conspicuos en la coloración del perianto durante la antesis y post-antesis (cf. Figs. 1 A-C vs 2 B-E), la especie ha sido descrita bajo diversos sinónimos. Aún recientemente, algunos autores piensan que hay evidencias suficientes para considerar la existencia de un complejo de especies, formado por *A. pichinchenses*, del Ecuador (Pfeifer, 1977) y *A. gorgona*, de Costa Rica y Panamá (Blanco, 2002, 2005).

La biología floral de *Aristolochia grandiflora* ha sido estudiada por Cammerloher (1923), Petch (1924), y

Daumann (1959) entre otros. Aunque los polinizadores primarios de la especie son dípteros, parece ser que varían entre localidades; por ejemplo, en Veracruz (México) la especie es polinizada por dípteros de la familia Calliphoridae (Burgess *et al.* 2004), en tanto que en Costa Rica son polinizadas por Otitidae y Muscidae (Hilje, 1984). Los frutos son cápsulas cilíndricas con numerosas semillas aplanadas, que eventualmente pueden formarse aún en ausencia de polinizadores primarios, en condiciones de cultivo (Fig. 2 F). En estado nativo, se tienen registros de floración y fructificación prácticamente a lo largo del año.

El potencial de uso de *A. grandiflora* radica en su alto valor ornamental, además de sus propiedades como planta medicinal y/o mágica empleada en muy diversas afecciones (citadas en los resultados del presente trabajo), lo cual hace de esta especie un recurso promisorio para Colombia, siempre y cuando se logren desarrollar las tecnologías apropiadas para su cultivo extensivo y los conocimientos biológicos necesarios para su uso, manejo y conservación adecuados, a fin de prevenir su extinción en el país.

En el presente trabajo se documenta la variación floral de la especie, incluidas dos colecciones en estado silvestre provenientes del Chocó, y se hace una breve descripción de la ontogenia de la flor, en particular del perianto, a fin de examinar la forma de desarrollo y las peculiaridades morfológicas de la flor de *A. grandiflora*. A la vez, se describe la especie de manera detallada y se provee una lista de ejemplares de los que se sabe, con certeza o con alta probabilidad, que corresponden a colecciones en estado silvestre.

Materiales y métodos

Microscopía electrónica de barrido. Se recolectaron flores maduras y botones florales en distintos estados de desarrollo. Las muestras para estudio al microscopio elec-

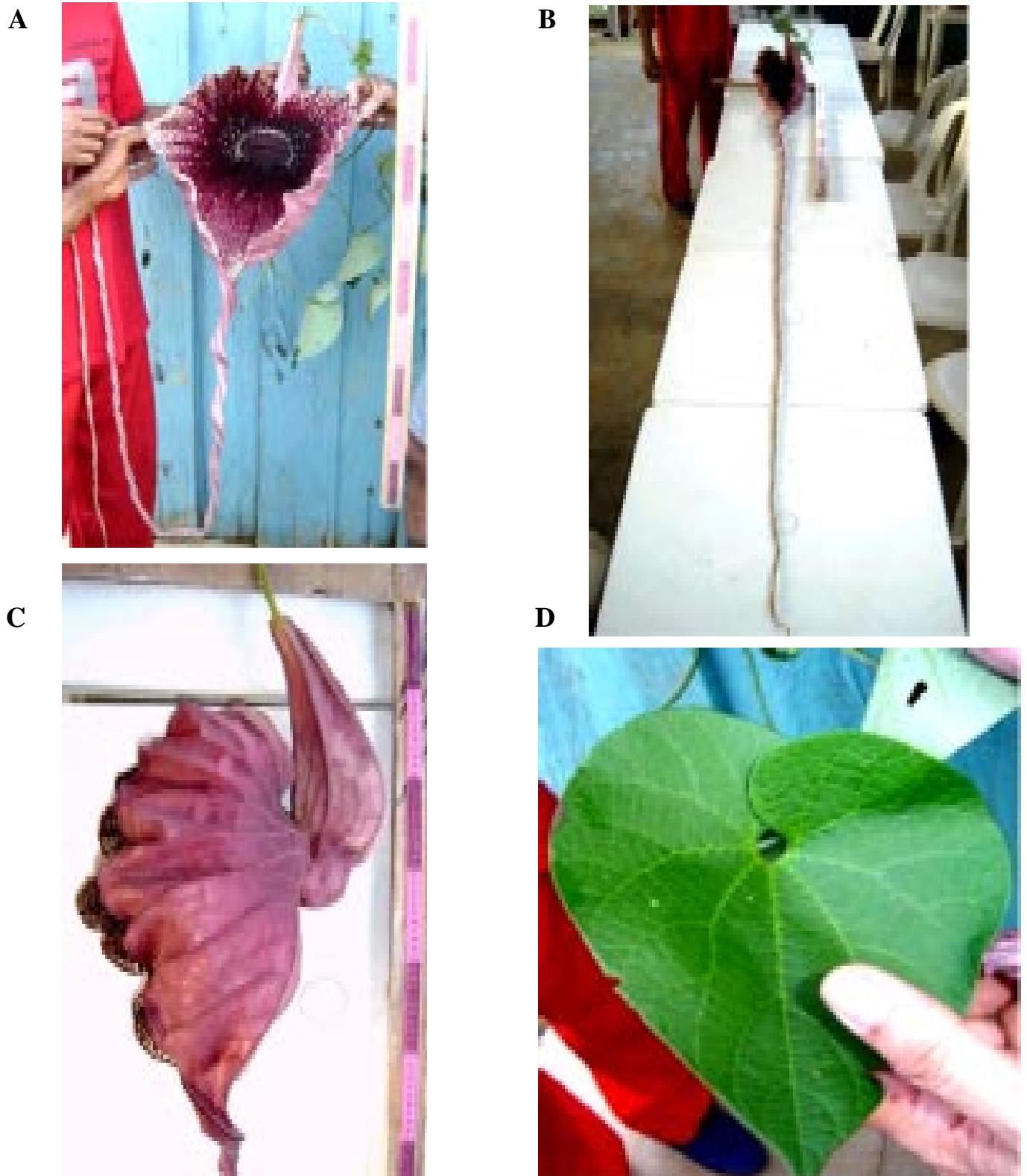


Figura 1. *Aristolochia grandiflora* (H. Valois & E. Rentería 372). **A.** Flor en anthesis, vista frontal. **B.** Flor en anthesis, mostrando la cauda. **C.** Flor en anthesis, vista lateral. **D.** Hoja. (Fotografías: H. Valois & E. Rentería).

trónico de barrido fueron fijadas en etanol al 70%, disectadas en etanol al 90% bajo un estereoscopio Leica MZ 7.5, y deshidratadas en una serie de etanol:acetona (90% etanol, 30 min; etanol absoluto, 30 min; etanol absoluto:acetona, 10 min; acetona, 10 min). Posteriormente fueron secadas con CO₂ líquido en un CPD Blazer 020, recubiertas con oro-paladio en un equipo Hummer 6.2 y examinadas y fotografiadas en un microscopio Jeol JSM T-300.

Anatomía y vascularización floral. Las secciones transversales fueron hechas a mano alzada, y observadas directamente en un microscopio Nikon Apophot y en un estereoscopio Leica MZ 7.5, equipado con una cámara lúcida para dibujo. Los ejemplares testigo se citan con las figuras respectivas.

Estudio de ejemplares de herbario. Los ejemplares de herbario fueron examinados de manera convencional, bajo estereoscopio, a fin de proveer datos acerca de la variación en las características epidérmicas, incluidos tricomas, papilas, y nectarios florales. Las descripciones y citación de ejemplares examinados siguen los parámetros editoriales de las monografías para Flora Neotrópica. A fin de documentar en forma precisa la variación de la forma y los patrones de coloración florales, se recomienda que las colecciones sean documentadas con una fotografía a color (en vistas lateral y frontal); la forma y el color de las flores se deteriora de forma extrema durante el proceso convencional de secado.

Resultados

Desarrollo floral. La flor de *Aristolochia grandiflora* se desarrolla a partir de un primordio oval que se encuentra inmediatamente por encima de una bráctea peltada (Fig. 3 A). En el primordio floral se diferencia inicialmente el sépalo medial, seguido por los sépalos laterales (Fig. 3 A, B). El crecimiento de los tres primordios de sépalos resulta en la formación de una zona tubular en la base, en tanto que los ápices de los primordios convergen en el ápice (Fig. 3 B, C). La fusión postgénita de los primordios laterales con el medial es mucho más marcada que la fusión de los flancos adyacentes de los primordios de los sépalos laterales (Fig. 3 D). El seno formado por los sépalos laterales entre sí, comienza a delinear lo que posteriormente será la apertura floral. Entre tanto, la fusión de los ápices de los tres primordios de los sépalos comienza a formar lo que corresponderá a la zona laminar de la flor (limbo) incluida la cauda.

Los tricomas de la superficie externa del perianto comienzan a diferenciarse a lo largo de la zona media de

cada primordio de sépalo, simultáneamente con el inicio de la diferenciación del botón floral en las zonas propias de las flores de *Aristolochia*, es decir, el ovario ínfero, el utrículo, el tubo y el limbo (Fig. 3 D). A la vez, se comienza a formar la curvatura del botón floral, como resultado de un crecimiento mayor a lo largo del flanco correspondiente al sépalo medial; dicho crecimiento da como resultado que el flanco del sépalo medial se hace convexo, en tanto que el flanco comisural formado por la fusión de los dos sépalos laterales se hace cóncavo (Fig. 4 A-I). Enseguida, el primordio floral crece de manera intensa, a la vez que se delinear las curvaturas finales que caracterizan la flor madura, incluido el desarrollo extremo de la cauda (Fig. 2 A). Por lo tanto, la cauda está formada por el crecimiento intenso y continuo de los tres ápices sepales fusionados post-genitamente. Durante las fases intermedias del perianto, se desarrollan dos estructuras internas en el tubo floral: la siringe, un reborde tubular formado entre el utrículo y el tubo (Figs. 2 G, 4 E); y el anillo, un reborde laminar formado entre el tubo y el limbo (Figs. 2 G, H, 4 G).

Los nectarios presentes en el interior del utrículo (descritos en detalle por **Daumann**, 1959) son de tipo tricomatoso, y junto con los tricomas cónicos que recubren el interior del tubo y del anillo (descritos por **González** 1999 a, y **González & Stevenson**, 2000), se forman en etapas tardías del desarrollo floral.

Todas las especies de *Aristolochia* s. l. presentan un ginostemo, que corresponde a una estructura formada por la fusión congénita de las anteras con las comisuras de los estilos. El desarrollo del ginostemo de *Aristolochia grandiflora* no difiere del registrado en otras especies neotropicales presentadas por **González** (1999 a) y **González & Stevenson** (2000 b). En estado de antesis, el ginostemo varía de manera drástica, lo cual obedece a la proteroginia que se presenta en muchas especies del género, y que se hace visible porque al inicio de la antesis los lóbulos estigmáticos se encuentran extendidos, húmedos y receptivos, en tanto que las anteras aún se encuentran indehiscentes (Fig. 2 I, izquierda); durante la antesis tardía, los lóbulos se contraen hacia el centro del ginostemo, dejan de ser receptivos y las anteras liberan el polen (Fig. 2 I, derecha).

Descripción de *Aristolochia grandiflora*. A continuación se describe la especie, incluidas las referencias taxonómicas más importantes, una lista de los sinónimos, la distribución geográfica, usos y aspectos ecológicos sobresalientes, a fin de reunir la mayor cantidad posible de la variación de la especie.

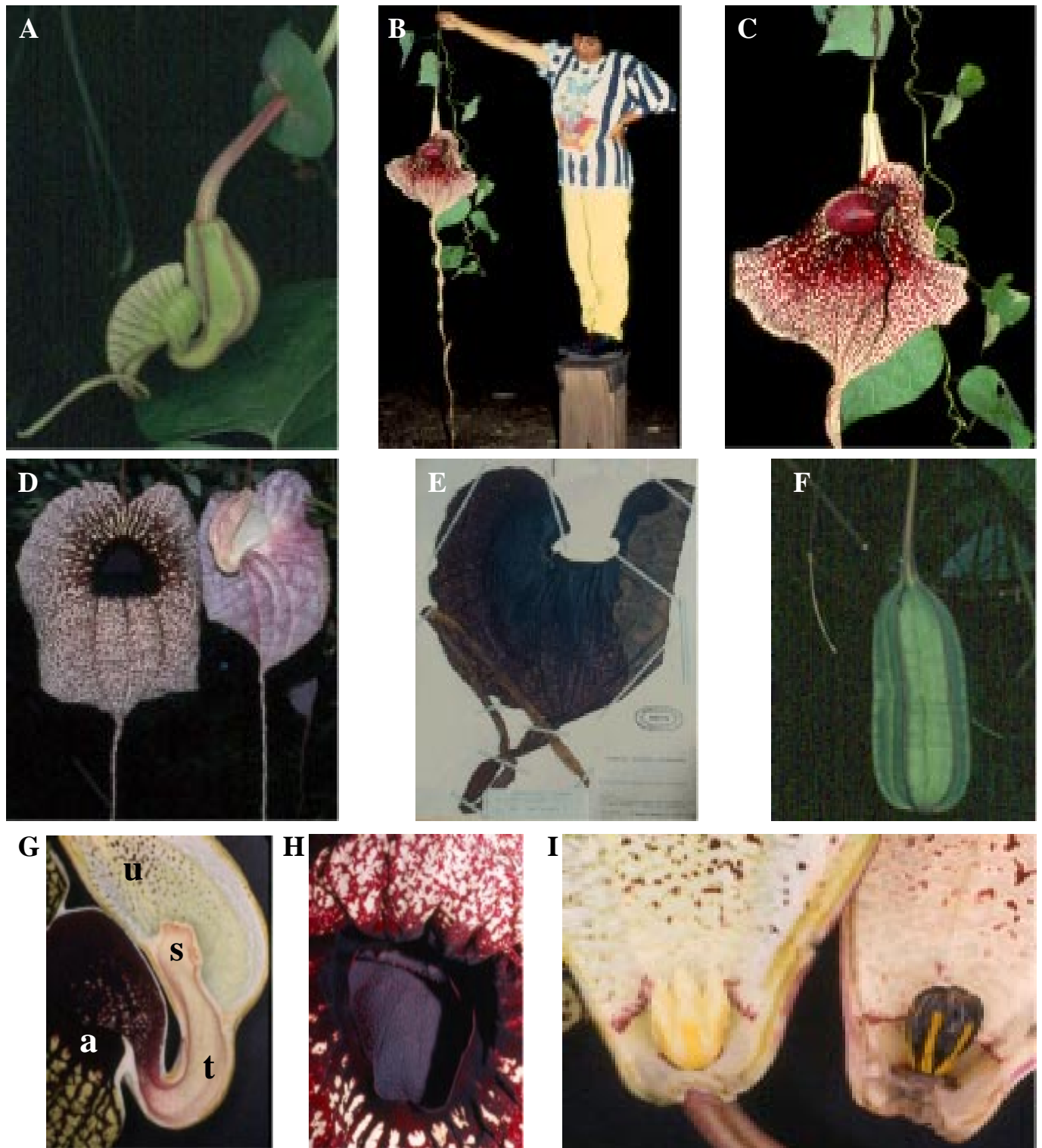


Figura 2. *Aristolochia grandiflora*. **A.** Botón floral, vista lateral (Ejemplar en cultivo, New York Botanical Garden). **B, C.** Ejemplar Galeano & Bernal s.n. (COL). **D.** Ejemplar en cultivo (Royal Botanic Gardens, Kew). **E.** Ejemplar García-Barriga 16101 (COL). **F.** Cápsula (ejemplar en cultivo, Royal Botanic Gardens, Kew). **G.** Detalle del interior del perianto, vista lateral; **a**, anillo; **l**, limbo; **s**, siringe; **t**, tubo, **u**, utrículo. **H.** Anillo, vista frontal. **I.** Ginostemo en fase femenina (izquierda) y masculina (derecha). (Fotografías: A, D-I, F. González; B, C, R. Bernal).

Aristolochia grandiflora Sw., Prodr. Veg. Ind. Occ. 126. 1788. Fl. Ind. Occ. 3:1566. 1806, *non* Vahl 1791, *nec* Gomez 1803, *nec* Arruda 1816; Spreng. Syst. Veg. 3: 752. 1826; D. Dietr. Syn. Pl. 5: 197. 1852; Duchartre in DC. Prodr. 15 (1): 472. 1864; Standl. Contr. U.S. Natl. Herb. 23(2): 240. 1922; Publ. Field Mus. Nat. Hist., Bot. Ser. 18 (2): 411. 1937; Schmidt, Nat. Pflanzenf. 16 b: 239, t. 110b. 1935; Hoehne, Fl. Brasilica 15(2): 78, t. 47. 1942; Standl. & Steyerl., Fieldiana, Bot. 24 (4): 96. 1946; Pfeifer, Ann. Missouri Bot. Gard. 47: 318, t. 97. 1960, 53: 164, t. 37. 1966; Huertas & Camargo, Cat. Ilustr. Pl. Cundinamarca 6: 138. 1976; Barringer, Fieldiana, Bot. New. Ser. No. 13: 83, t. 12b. 1983; González, Flora de Colombia 12: 94, t. 24. 1990; Flora of Ecuador 51:24. 1994. **Tipo.** Jamaica, sin localidad ni fecha precisas (fl), *Swartz s.n.* (Holotipo S; duplicado BM # 000040909).

Sinonimia: *A. 2-scandens* P. Br. Civ. Nat. Hist. Jamaica 329.1756, *non* Mill 1768 (*ex char.*); *A. caudata* L. Syst. Nat. 2:600.1767, *non* Jacq. 1760, *nec* Booth ex Lindl. 1831, *nec* Parodi 1878 (*ex char.*); *A. foetens* Lindl. Bot. Reg. t. 1824. 1836 (*ex ic.*); *A. gigas* Lindl. Bot. Reg. 8: 51. 1842, tipo: Guatemala: sin localidad ni fecha precisas (fl), *Hartweg s.n.* (K, foto COL); *A. gigantea* Hooker in Curtis, Bot. Mag. t. 4221.1846, *non* Mart. & Zucc. 1824 (*ex ic.*); *Howardia foetens* (Lindl.) Klotzsch, Monatsber. Konigl. Preuss. Akad. Wiss. Berlin 1859: 609. 1859; *H. gigantea* (Hooker) Klotzsch, Monatsber. Konigl. Preuss. Akad. Wiss. Berlin 1859: 610. 1859; *H. grandiflora* (Sw.) Klotzsch, Monatsber. Konigl. Preuss. Akad. Wiss. Berlin 1859: 610. 1859; *Aristolochia grandiflora* Sw. var. *hookeri* Duchartre in DC. Prodr. 15 (1): 473.1864 (basada en *A. gigantea* Hooker); *A. gigas* Lindl. var. *sturtevantii* W. Watson, Gard. & Forest 4(195): 546.1891 (*ex char.*); *A. cordifolia* auct. *non* Kunth: Uribe, Fl. Colombia 1: 121. 1897;

A. cordiflora auct. *non* Mutis ex HBK.: Fournet, Fl. Guadeloupe et Martinique 514. 1978; *A. pichinchensis* Pfeifer, Selbyana 2:29-30. 1977, tipo: Ecuador: Los Ríos, Río Palenque Biological Station, Km 56 Quevedo-Santo Domingo, 150-220 m, 30 Nov 1972 (fl), *C. H. Dodson 5215* (Holotipo, CONN; isótijos MO, QCA, SEL, RPSC n.v., US).

Bejucos glabrescentes o pubérulos, a veces con un exudado ligeramente amarillento, tricomas adpresos, < 1 mm largo. Pseudoestípulas ausentes. Pecíolo 5-15 cm largo, pubérulo; lámina ovada a ancho-ovada, 6-20(-30) x 6-16(-21) cm, no subhastada, membranosa, base profundamente cordado-lobada, no peltada, seno 1.5-4.3(-7) cm profundo, ápice agudo a acuminado, haz glabrescente, envés pubérulo, venación campilódroma, venas primarias

basales 7(9). Inflorescencias parciales axilares, cimosas, unifloras, con una bractéola perfoliada, circular, 18-40 x 22-45 cm. Pedúnculo más ovario 12-23.5 cm largo. Perianto fuertemente incurvado, tomentoso exteriormente, glabrescente al madurar; utrículo obovoide, (6-)10-12(-16) cm largo, 2-3.5 cm diámetro; siringe inequilátera, 1-3 cm largo; tubo fuertemente incurvado en la parte media, bullado en la mitad distal, 7-13.5(-18) cm largo, 1-2 cm diámetro proximal, 3-5 cm diámetro distal, en ángulo obtuso respecto al utrículo; anillo 1-1.5 cm ancho, reduciendo el diámetro de las fauces a 1.5-3.5 cm; limbo unilobado, ancho-obovado, (8-)19-35 (sin la cauda) x 12-31 cm, no fimbriado, en ángulo de ca. 90° con el tubo, base cordada, seno hasta de 7 cm profundo, ápice caudado, cauda 7-250 x 1-3 cm. Ginostemo 0.9-1.8 cm largo. Cápsula oblonga, 13-15.5 cm largo, 3.2-3.5 cm diámetro, mútica. Semillas ancho-ovoides, 1-1.4 x 1-1.3 cm, planas, no aladas, rafe prominula.

Nombres vernáculos. Alcatraz (Guatemala, México); Alena sili (Colorado, Ecuador); bastard contrayerba (Belize); betia olorosa (Ecuador); bonete del diablo, bonete de fraile (Guatemala, México); cisne (Guatemala, México); contrahierba (Jamaica); cou de canard (Guadalupe, Martinica); chompipe, chompipona, chumpa (Guatemala, México); flor de pato (Guatemala, México); garzón (Honduras); guaco, guaco grande (Belice, El Salvador, Guatemala, México); gueguecho de zope (Guatemala, México); Gueguechón (El Salvador); hediondilla (Guatemala, México); hierba del indio (Guatemala, México); moco de guegueche, moco de gueguecho (El Salvador); moño de pato (Honduras); paticos, patitos, pato (Cuba, Guatemala, México); pelícano (Guatemala, México); poisoned hogmeat (Jamaica); sombrero de don Zope (Guatemala, México); swan flower (Jamaica); "Tutu nunut, wagar barbad" (kuna, Panamá); uahko, uahkoh, wahk'oh (Guatemala, México).

Usos. *Aristolochia grandiflora* es usada como abortiva, antiasmática, antidepresiva, antimalárica, antiofídica, antirreumática, aromática, astringente, así como para detener la menstruación y para el tratamiento del cólera, escalofríos, fiebre amarilla, enfermedades hepáticas, paludismo, rabia, tétanos y sífilis. La especie ha sido destacada como una planta medicinal promisoriosa tanto en literatura técnica como en medios de difusión (cf. **Lee McFarling**, 1994). Es de mencionar que se conoce el efecto tóxico de *Aristolochia* en humanos, consistente principalmente en daños hepáticos y renales severos. Dicha toxicidad ha conllevado a la prohibición, por lo menos en Europa, de medicinas que contengan sustancias derivadas de *Aristolochia*.

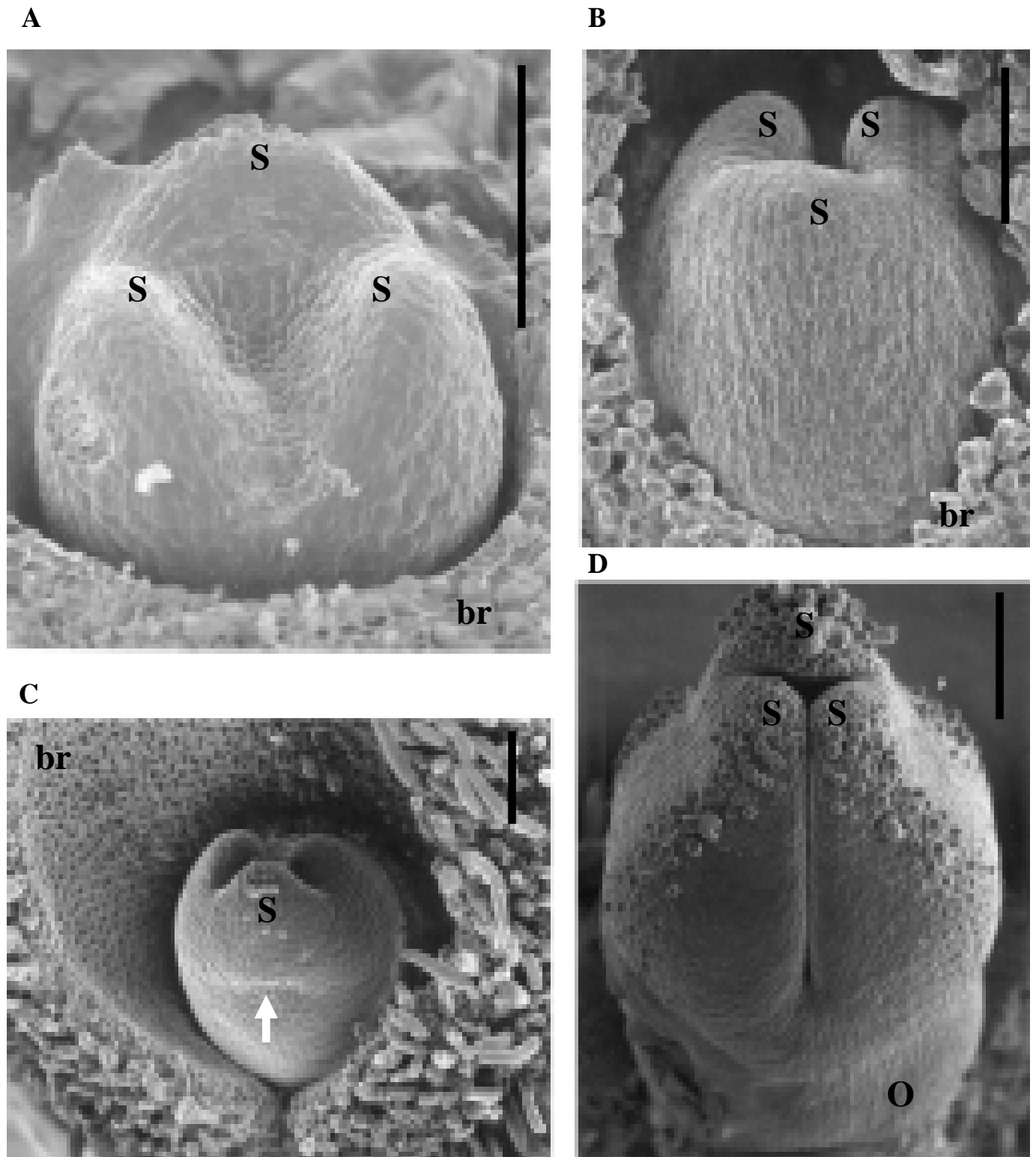


Figura 3. Desarrollo del perianto de *Aristolochia grandiflora* (González 3443). **A.** Iniciación de los tres sépalos, vista adaxial. **B.** Iniciación de la formación del tubo floral, vista abaxial. **C.** Iniciación de la curvatura del tubo floral (flecha), vista abaxial. **D.** Iniciación de la fusión postgénita de los ápices sepalares que formarán la cauda y la apertura floral, vista frontal. **Br.** bráctea; **o.** ovario; **s.** sépalo. Escalas: 100 μ m.

Se han documentado usos relacionados con rituales, quizás debido a la apariencia de la flor; entre éstos se pueden citar algunos consignados en etiquetas de herbario, tales como: "cleaning the house" (*Kvist & Asanza 40718*), "Elicited shouts of laughter when shown to local inhabitants, apparently from obscene connotations" (*Madison 708*); y "los Kunas evitan que los niños toquen y miren la flor porque podrían manchárseles la cara como la flor" (*Herrera 362*).

Ejemplares examinados: A continuación se relacionan los ejemplares examinados que corresponden a colecciones de la especie en estado nativo.

MÉXICO. Chiapas: Mun. Ocosingo, road to Ocosingo along the Jol uk'um, montane rain forest 70 km SW of Palenque, 550 m, 7 Nov 1980 (fl), *D.E. Breedlove 47192* (NY); El Chichón, 2 km from Ostuacan on road to Pichucalco, 25 Feb 1984 (fl), *R. Burnham & R.A. Spicer 137* (BM); Tapachula, 500 ft., 11 Aug 1935 (fl), *G.L. Fisher 35500* (F, MO, NY, foto COL); a 4 km al SE de Nvo. Guerrero, camino a Boca Lacantun, Mpio. Ocosingo, 650 m, 24 Ene 1986 (fr), *E. Martínez 16714* (MO, TEX, foto COL); Mpio. Ocosingo, en Chajul a la orilla del río, alt. 150 m, 27 Oct 1992 (fl), *E. Martínez et al. 25498*, fl (K); 14 Feb 1936 (fl), *E. Matuda 494* (K, MO, foto COL); Escuintla, 6 Jul 1936 (fl), *E. Matuda 2234* (UC); Acacoyagua, 29 Feb 1948 (fl), *E. Matuda 17628* (F, K); from Chicharras, alt. 3000-6000 ft, 6 Feb 1896 (fl), *E.W. Nelson 3746* (GH, US); near the ruins, La Arena, 14 Mar 1958 (fl), *B. G. Schubert & A. Gómez-Pompa 1737* (A); SW side of the Presa de Malpaso, Mun. Ocozocoautla de Espinosa, 2200 ft, 2 Mar 1968 (fr), *A. Shilom Ton 3770* (TEX-LL). **Oaxaca:** Pochultla, cultivated, Oct 1901 (fl), *C. Conzatti & V. González 1181* (GH); Mpio. Santa María Chimalapa, Río Milagro, Paso Las Naranjas, ca. 6 km E Sta María, 16°54'N, 94°39'W, alt 200 m, 9 Jun 1984 (fl fr), *H. Hernández 105* (CHAPA); district of Tuxtepec, Chiltepec and vic., alt. ca. 20 m, Jul 1940-Feb 1941 (fl), *G. Martínez Calderón 74* (A, US); camino de Santiago Tutla entrando por la sabana, al N de Palomares, Distr. Mixe., 12 Feb 1984 (fl), *R. Torres 4642* (MEXU). **Tabasco:** Tacotalpa, entrada a Puyacatengo, 100 m, 18 Nov 1978 (fl), *C. Cowan 1730* (CHAPA, MO, NY, TEX-LL); Palo Verde, 5 km S de Balancán, 40 m, 4 Mar 1983 (fl), *R. Fernández N. & Guadarrama 1342* (MO, NY); Teapa, grutas de Coconá, 3 Km al NE de taspa, 17°35'N, 92°54'O, alt 50 m, 12 Feb 1989 (fl), *Ishiki & al. 2015* (CHAPA); Macuspana, centro recreativo Agua Blanca, 17 Feb 1984 (fl), *M. Magaña et al. 1212* (MO); Mun. Teapá, selva de cerro del Coconá, grutas de Coconá, 18 Nov 1979 (fl), *G. Ramos & C. Cowan 2695* (NY); Hda. La Colmena, s.f. (fl), *J.N. Roviroso 395* (K, NY); Mun.

Macuspana, Aguan Blanca, 17 Feb 1984 (fl), *F. Ventura A. 20947* (NY). **Veracruz:** Benito Juárez Segundo, 17°47'N, 94°39'N, 100 m, 2 Nov 1978 (fl), *G. Castillo 374* (F); Tuxtla, Mun. San Andrés, Salto de Eyipantla, carretera Catemaco-San Andrés, 19 Feb 1985 (fl), *R. Cedillo 3041* (MEXU); Puente de El Poblado I Palma a 25 km al N de Catemaco, Mun. Catemaco, sd (fl), *R. Cedillo 3561* (COL, MEXU); "Prov. Veracruz", 1000 pg., May 1835-1840 (fl), *H. Galeotti 215* (P); nr. Sontecomapán, alt. 50 m, 31 May 1981 (fl fr), *Gentry & Lott 32509* (F, MO, TEX-LL, foto COL); vic. Campamento La Laguna, Mun. Hidalgotitlán, 17°17'N, 94°30'W, alt. 100 m, 1 Mar 1984 (fl), *M. Nee et al. 29721* (MO, NY); Córdoba, 11 May 1912 (fl), *F. Salazar s.n.* (MEXU); Congregación Tezcaltitán, 21 Mar 1967 (fl fr), *M.P. de Souza & M. Sousa 160* p.p. (mezclado con hojas de *Dalechampia*) (WU); Calería, región de Los Tuxtlas, 22 Ene 1965 (fl), *M. Sousa 2029* (TEX-LL); Los Tuxtlas, Mun. San Andrés, Tescaltitan, 220 m, selva alta perennifolia (fl), *M. Sousa 2796* (MEXU); Brecha hnos. Cedillo-La Escuadra, Halgotitlan, 17°18'N, 94°38' W, 27 Feb 1974 (fl), *B. Vásquez 38* (MEXU); 2 km W del campamento Hermanos Cedillo, Halgotitlan, 150 m, 17°16' N, 94°36' W, 13 Jan 1975 (fl), *B. Vásquez 1661* (MEXU); Cilapa, Mun. Santiago Tuxtla, 250 m, 1 Oct 1983 (fr), *F. Ventura A. 20711* (MO, foto COL); Minatitlán, 8.2 km N terracería Laguna-Río Grande, sobre el camino nuevo a Ejido Belisario Domínguez, 17°22'N, 94°22'W, 130 m, 16 Jul 1980 (fl), *T. Wendt & al. 2583* (CHAPA); Minatitlán, 10.3 km E de La Laguna, 17°17' N, 94°24' O, alt 140 m, 20 Jun 1982 (fl), *T. Wendt & M. Vasquez, 3934A* (CHAPA); Fortín de las Flores, s.f. (fl), *L.O. Williams s.n.* (foto F). **Yucatán:** Puatan Is. 13 Jan 1895 (fl), *A.V. Armour 68* (GH); 1895 (fl), *G. F. Gaumer 327* (BM, G, GH, MO, NY, US); cult. from living specimen brought from the island of Ruatán, 22 Feb 1906 (fl), *J.M. Greenman 454* (GH, NY). **Sin localidad precisa:** Orizaba (fl), *Botteri 157* (GH); 14 Feb 1936 (fl), *E. Matuda 494* (A, MO, NY, US); (fl), *Sesse & Mociño s.n.* (G); *Novae Hispaniae, 1787-1795-1804* (fl), *Sesse & Mociño 4415* p.p. (F, MA [p.p.],).ex *Herb. Pavón*, (fl), (FI-WEBB).

GUATEMALA. Alta Verapaz: Sebol, 20 Apr 1964 (fl), *E. Contreras 4420* (TEX-LL); near the Finca Sepacuute, 18 Mar 1902 (fl), *O.F. Cook & R.F. Griggs 22* (US); idem, 26 Mar 1902 (fl), *O.F. Cook & R.F. Griggs 182* (US); near Sepacuité, 16 Jan 1905 (fl), *W.R. Maxon & R. Hay 3291* (US); Cubilquitz, alt. 350 m, Feb 1904 (fl), *H. von Tuerckheim 8573* (F, GH, US), idem 350 m, Jul 1907 (fl), *von Tuerckheim 11869* (US). **Chiquimula:** Eastern portions of Verapaz and Chiquimula, 1885 (fl), *S. Watson 378* (GH). **El Progreso:** along railroad

between Barranquillo and Cruz, alt. 620-650 m, 30 Jan 1942 (fl), *Steyermark 43329* (F, NY). **Escuintla:** Cuyuta, alt 200 pp, Apr 1890 (fl fr), *J. Donnell-Smith 2063* (G, K, US); San Juan Mixtan, alt. 500 pp, Apr 1890 (fl), *J. Donnell-Smith 2064* (US); Río Michatoya, alt. 1100 pp, Apr 1890 (fl), *J. Donnell-Smith 2065* (US); Las Playitas, 10-18 May 1919 (fl), *H. Pittier 8533* (NY, US); Cuyuta, alt. 200 pp., Apr 1890 (fl), *J. Donnell-Smith 2063* (F, GH, NY, P). **Izabal:** Las Playitas, 17 May 1919 (fl fr), *S. F. Blake 7493* (US). **Jalapa:** near Guastetoya, 18 Feb 1907 (fl fr), *W.A. Kellerman 2275* (US); El Rancho, 1000 ft, 20 Jan 1908 (fl), *W.A. Kellerman 8094* (F, NY, US). **Jutiapa:** 25 Ago 1975 (fl), *R. Matta s.n.* (USCG). **Petén,** río Petexbatun, between Sayaxche and Lake Petexbatun, 4 Feb 1964 (fl), *C.L. Lundell 17671* (TEX-LL). **Retalhuleu:** Retalhuleu, 237 m, 20 Jan 1907 (fl), *W.A. Kellerman 6590* (F, US); Retalhuleu, alt. ca. 300 m, 27 Feb 1939 (fl), *Standley 66672* (F); vic. Of Las Delicias, S of Retalhuleu, alt. ca. 200 m, 22 Feb 1941, (st), *Standley 87997* (F); vic. Retalhuleu, alt. 240 m, 17 Feb-1 Mar 1941 (fr), *Standley 88611* (F). **Sacatepéquez:** volcán Santa Clara, cerca de El Naranjo, 1000 m, 22 Feb 1948 (fl), *L.R. Holdridge 2296* (US); SW lower slopes of Volcán Zunil, in vic. Of Finca Montecristo, SE of Sta María de Jesús, alt. 1200-1300 m, 31 Jan 1940 (fl), *Steyermark 35232* (F). **San Marcos:** Río Cabús, nr. Malacatán, alt. ca. 300 m, 15 Mar 1939 (fl), *Standley 68892* (F); above Finca El provenir, on "Todos los Santos Chiquitos" lower south-facing slopes of Volcán Tajumulco, 1300-1500 m, 7 Mar 1940, (st), *Steyermark 37231* (F). **Santa Rosa:** Santa Rosa, 3500 pp, 4 Nov 1892 (fl), *Heyde et Lux 3825* (F, G, GH, MO, NY, P, US, foto COL); nr. El Molino, ca. 600 m, 26 Nov 1940 (fl), *Standley 78395* (F). **Zacapa:** 620 ft., 25 Jan 1905 (fl), *Chas. C. Deam 158* (GH). **Sin localidad precisa:** Guatemala, 1892 (fl), *M. Donnell Smith 3825* (P); s.l. 1892 (fl), *E.T. Heyde 396* (US); Las Nubes, 4350 ft, Volcán Zunil, Feb 2, 1873 (fl), *O. Salvin s.n.* (K).

BELICE. Belice: Western Highway, track to Sibun River, 5 Oct 1992 (fl), *C. Whitefoord 8309* (BM). **El Cayo:** El Cayo, 13 Apr 1931 (fl fr), *H.H. Bartlett 12936* (A, NY, US); 6 Jul 1973 (fl), *J.D. Dwyer 11497* (MO, foto COL). **Stann Creek:** Stann Creek, 1 Apr 1937 (fl), *P.H. Gentle 1959* (F, GH, K, MO, NY, S, foto COL); 14 Miles Stann Creek valley, 19 Dec 1939 (fr), *P. Gentle 3131* (GH, MO, NY, US, foto COL); Acahual, Melinda Pine ridge road, 2 Feb 1953 (fl), *P.H. Gentle 7864* (TEX-LL). **Toledo:** Igua-na Creek road to Spanish Lookout, 17°15'N, 88°57'W, 20 Mar 1993 (fl fr), *Balick & Romero 3669* (NY); Ruatan Island (fl), *G.F. Gaumer 33* (K).

HONDURAS. Atlántida: Ceiba, 24 Oct 1916 (fl), *F.J. Dyer A. 144d* (F, US); Ruatan Island, Aug 1886 (fl), *G.F. Gaumer s.n.* (US); Vic. La Ceiba, mountain slopes and coastal plains, 16 Jul 1938 (fl), *T.G. Yuncker et al. 8466* (G, GH, MO, NY, TEX, US) (MO). **Comayagua:** Guamil shore brush of Lake Yojoa, near Pito Solo, 16 Feb 1974 (fl), *D. Harlett 1216* (MO, foto COL); quebrada Montañuela, bosque mixto entre Trincheras y Montañuelas, 1400 m, 18 Jul 1962 (fl fr), *A. Molina 10867* (F, NY, TEX-LL, US); unión ríos Yuré-Humuya, 100 km NO ciudad Comayagua, 200 m, 22 Nov-31 Dic 1980 (fl), *C. Nelson et al. 6095* (MO). **Cortés:** San Pedro, alt. 600 pp, Apr 1887 (fl), *C. Thieme 5436* (F, US); Agua Azul, 630 m, 7 Aug 1948 (fl), *L.O. Williams et al. 14468*. **Islas de la Bahía:** 4 km E of Coxenhole, Roatán Island, alt. 5-20 m, 21 Apr 1967 (fr), *A. Molina 20739, 20807* (F, NY, US). **Olancho:** alred. Catacamas, 7 Abr 1971 (fl), *M. Hernández & G. Rendón 5449* (MO, foto COL); falda del cerro El Boquerón, 20 km NE de Juticalpa, 700 m, 15 Ene 1982 (fl), *R. Perdomo 263* (MO); Vic. Catacamas, 450-500 m, 18-26 Mar 1949, (st), *Standley 18382* (F). **Sta. Bárbara:** nr. Rincón del Mico, Lake Yojoa, alt. 630 m, 2 Jan 1953, *L.O. Williams et al. 18811* (US). **Yoro:** La Ceiba, on road to Olancho, elev. 700 m, 16 Aug 1972 (fl), *M. Madison 708* (GH). **Sin localidad precisa:** Tela, Lancetilla Valley watershed, 25-27 Jul 1960 (fl), *H.W. Pfeifer et al. 2034* (CONN, US); East Honduras, Aug 1887 (fl), *Chas. Toursend s.n.* (F, US); between Tela and Lancetilla, 7 Aug 1934 (fl), *T.G. Yuncker 4502* (F, NY).

EL SALVADOR. La Libertad: nr. Colón, 2000 m, 21 Jan 1949, (st), *L.O. Williams et al. 15198* (GH). **San Salvador:** May 1922 (fl fr), *S. Calderón 702* (GH, US); Vic. San Salvador, s.f. (fl), *C. Penson 209* (NY); vic. San Salvador, alt. 650-850 m, 2-7 Feb 1922 (fl), *Standley 20545* (GH, MO, NY, US, foto COL); vic. of San Salvador, alt. 650-850 m, 30 Mar-24 Apr 1922 (fl), *Standley 23197* (GH, US); about 0.4 km W of Hacienda buildings, finca of General J.T. Calderón, Montes de Cacahuatique, lat. 13°46'N, long 88°13'W, alt. ca. 1310 m, 1 Jan 1942 (fl), *J.M. Tucker 688* (F, G, K, TEX-LL, UC, US).

NICARAGUA. Granada: Feb 1868, s.c. (US); 1867-1868 (fl), *Earl. Flint s.n.* (NY); "Env. De Grenade, Harb. Lagunes, 40 m", Feb 1870 (fl), *P. Lévy 448* (G, P). **Masaya:** La Laguna, 11°59'N, 86°07'W, elev. ca. 200 m (fl), *P.P. Moreno 25137* (MO). **Rivas:** Isla Ometepe, Volcán Maderas, camino desde la Punta de San Pedro hasta el caserío de San Pedro, 11°24'-25'N, 85°27'-28'W, elev. 40-100 m, 18 Ene 1985 (fl), *W. Robleto 1735* (BM, MO, foto COL); Isla Ometepe, N shore of isthmus, last high (rocky) ground on Volcán Concepción side, ca. 11°29'N, 85°32'W, elev.

ca. 40 m, 26 Feb 1978 (fl), *W.D. Stevens 6637* (F, MO). **Zelaya:** Wany, 5 km al SW de Siuna, ca. 13°30'40" N, 84°45'30" W, 27 Oct 1982 (fl), *A. Grijalva & F. Burgos 1592* (MO, foto COL). Bonanza, on grounds of Neptune Mining Co., ca. 14°02'N, 84°35'W, elev. ca. 350-450 m, 26 Feb 1979 (fl), *J. Pipoly 3500* (F, MO). Sin localidad específica: Nicaragua, "herbarium of the U.S. North Pacific Exploring Expedition, under Commanders Ringgold and Rodgers, 1853-56 (fl fr), *C. Wright s.n.* (GH, P, US).

COSTA RICA: Heredia: finca La Selva, the OTS Field station on the rio Puerto Viejo just E of its junction with the rio Sarapiquí, elev. ca. 100 m, 13 Sep 1981 (fl), *D. Smith 211* (MO). **Limón:** Cordillera de Talamanca, along río Barbilla, to ca. 0.5 km upstream from jct. with Quebrada Cañabral, 10°01'N, 83°24.5'W, 100 m, 8 Sep 1988 (fl), *Grayum et al. 8891* (MO). **Talamanca:**, env. De Sipuru, 150 m, Mar 1894 (fl), *H. Pittier & Tonduz 8744* (G); hacienda Chirripo, plains de Zent, 200 m, Feb 1900 (fl), *Pittier & Tonduz 16043* (BM, P); cultivé a S. Jose, s.f. (fl), *H. Pittier 16129* (NY, US); Apr 1894 (fl), *Tonduz 8744* (G, US). **Sin localidad precisa:** Estrella Valley, 50 m, 27 Jul 1925, *A. Alfaro s.n.*, fl (US).

PANAMÁ. Colón: along the Río Guanache, elev. 400 m, 5 Jul 1979 (fl), *T. Antonio 1230* (MO); walking upstream from bridge over río Guanache, 0-100 m, 19 Jan 1980 (fl), *T. Antonio 3376* (MO); bank of río Cascajal, ca. 1 km from the sea, 4 Apr 1980 (fl), *W. D'Arcy 13609* (MO); Santa Rita Ridge, 30 Dec 1971 (fl), *J.D. Dwyer & A. Gentry 9337* (F, MO, NY); Santa Rita Ridge east of transisthmian highway, 300-500 m, 20 Sep 1972 (fl), *A. Gentry 6118* (F, MO, NY, WAG); nr. Mouth of río Guanache, 1 Oct 1972 (fl fr), *A. Gentry 6301* (MO); Río Guanache, 3-7 km above bridges, elev. 300-700 ft, 1 Oct 1978 (fl), *Hammel et al. 4955* (MO); 1-2 km from the Portobelo Highway up the rio Guanache, 9°30'N, 79°40'W, elev. 0-50, 17 Feb 1982 (fl fr), *S. Knapp & R. Schmalzel 3570* (BM, F, MO); Fató (Nombre de Dios), at sea level, Jul-Aug 1911 (fl), *Pittier 4145* (BM, F, GH, MO, NY, US). **Darién:** trail between Pinogana and Yavisa, ca. 15 m, 17 Mar 1937 (fl), *P.H. Allen 291* (A, MO); Vic. Yape, ca. 30 m, 4 Oct 1938 (fl), *P.H. Allen 867* (MO); vic. Pinogana, 20 m, 4 Mar 1947 (fl), *P.H. Allen 4292* (BM, G, MO); near Refugio, 15-21 mi NO of Santafé, elev. ca. 30 m, 16 Feb 1967 (fl), *J.A. Duke 10293* (MO); río Areti, 7 Nov 1967 (fl), *Duke & Nickerson 14923* (MO); río Pirré, between Pirré and El Real, 30 Dec 1972 (fl), *A. Gentry et al. 7093* (MO, TEX-LL). **Panamá:** a 10 m río Chagres y a 150 m del puente, 15 Feb 1976 (fl), *E. Ballesteros 35* (MO); Serranía de majé, trail along Río Ipetí, nr. Confluence with Río Ambroino, alt. 100 m, 8°57'N, 79°32'W, s.f. (fl), *H.W. Churchill et al. 4476* (MO). **Sin localidad precisa:** Co-

marca de San Blas, río Cangandi, pueblo Cangandi, 0-20 m, 9°27'N, 79°07'W, s.f. (fl), *H. Herrera 362* (MO); Comarca de San Blas, Cangandí, elev. 30 m, 9°24'N, 79°24'W, 27 Mar 1986 (fl), *G. de Nevers et al. 7614* (MO); 1962 (fl fr), *J.A. Ducke 6142* (F, MO, NY).

CUBA: Santa Clara: Cienfuegos, Soledad, 1 Feb 1932 (fl), *J.G. Jack 8425* (GH, MO, NY, US).

JAMAICA. Green Island and vic., 13 - 15 Mar 1908 (fl), *N.L. Britton et al. 2134* (NY); parish of St. Thomas, Holland Bay, 1-13 Mar 1909 (fl), *N. L. Britton 4065* (F, NY, US); Stony Hill, 16 May 1904 (fl), *G.N. Collins 18* (US); near Castleton, 4 Nov 1902 (fl), *B. Harris 8438* (BM); Bog Halk, 17 Dic 1880?1912, *A. S. Hitchcock s.n.*, fl (MO); Port Moraut, 24 Dic 1880?1912 (fl), *A.S. Hitchcock s.n.* (MO); county of Middmax?, St. Ann Parish, near Claremont, Feb 1948 (fl), *F.W. Hunnewell 18825* (GH); 7 Dec 1850 (fl), *Metcalfe s.n.* (BM); William Ford, s.f. (fl), *Millspaugh 1958* (F); 11 Apr 1903 (fl), *G.D. Morce* (K); Portland Blue Mountains, Stony River Base Camp, 1250 ft, 17 Dec 1973 (fl), *B. D. Morley & C. Whitefoord 563* (BM, US); Portland Blue Mountains, Stony River Base Camp, 1250 ft, 16 Dec 1973 (fl), *B. D. Morley & C. Whitefoord 557* (BM); near the 46 mile stone on the Bath. Port Antonio road also along Sulphur river, 1924 (fl), *C. Norman 212* (BM); Parish St. Ann, Belmont Property, nr. Dunns River, 250-300 ft, 2 Dec 1954 (fl), *G. Proctor 9572* (A, NY, US); (fl), *L.C. Richard herbarium* (P); Black River, St. Elizabeth (fl), *Purdue s.n.* (K); Ca. Porti Antonii, pr. predium Dr. Wattson, 1786-91 (fl), *J.P.B. von Rohr 39* (BM); Dec 1890-91 (fl), *J. T. Rothrock 489* (F); near Kingston, 10 Mar 1885 (fl), *C.S. Sargent s.n.* (A); Hanover, Flower Hill district, on bank of the Cabaritta River, 700 ft, 31 Jan 1956 (fl), *W.T. Stearn 176* (BM); St. Ann, Liberty Hill, between Brown's Town and Dry Harbour (Discovery Bay), 16 Feb 1956 (fl), *W.T. Stearn 266* (BM); St. Mary Ballards Valley, near White River, S. of Port Maria, 200 ft, 18 Apr 1956 (fl), *W.T. Stearn 782* (A, BM); near Castletou Botanical Garden, 26-27 Jan 1903 (fl), *L.M. Underwood 44* (NY); St. Thomas, near Water Valley, 550', 24 Jan 1966 (fl), *J. W. Walker 309* (GH, NY, US); Morant Bay, St. Thomas, 11 Jul 1952 (fl), *West & J. Arnold 565* (FLAS); Port Antonio, road to Park Mount, 2.25 mi SE of city, alt. ca. 300°, 6 Feb 1906 (fl), *A. E. Wight 104* (F, NY); St. Catherine Río Cobre, Bog Walk, above Flat Bridge, 250-500 ft, 13 Jan 1958 (fl), *T. G. Yuncker 17944* (BM, F, G, NY, S). Sin localidad específica: (fl), *L. C. Alexander s.n.* (K).

GUADALUPE: s.l., s.f. (fl), *L. Hermenier s.n.* (G).

MARTINICA: *M. Belanger 269*, fl (P); "naturelese originarie de la Jamaïque ou il est commun A cilie de la maison principale de la Fontaine...", s.f. (fl), *P. Duss*

2104 (NY); Bios de La Fontaine, s.f. (fl), *L. Rodríguez* 3616 (P).

COLOMBIA. Antioquia: Río Chigorodocito, about 8 km E of Chigorodó, 40 km S of Turbo, alt. 100 m, 27 May 1945 (fl), *O. Haught* 4717 (COL); Anorí, El Bagre, secondary forest along Villa Crech, alt. 100 m, 10 Feb 1972 (fl), *D. D. Soejarto et al.* 3331 (HUA, MO, NY). **Córdoba:** margen del río Sinú Alto, cerca de Barrancones, 7 Jun 1985 (fl), *I. Leguizamón* 90 (JBG). **Chocó:** Mun. Riosucio, zona de Urabá, cerro del Cuchillo, camino Cuchillo Negro a Cumbre Noroeste, alt. 50-300 m, 22 Abr 1988 (fl fr), *D. Cárdenas* 1809 (COL, JAUM, MO); Mun. Nuquí, corregimiento de Arusí, Río Arusí, Nov 1991 (fl), *G. Galeano & R. Bernal s.n.* (COL); Nuquí-Panguí, río Panguí, 77°17', 5°19', 28 Dic 1991 (fl), *A. Gómez et al.* 379 (COL); Mun. Alto Baudó, corregimiento de Chachajo, bosque secundario al pie de la serranía del Baudó 10 Mar 2005 (fl), *H. Valois & E. Rentería* 372 (CHOCO, foto COL). **Cundinamarca:** Carretera de Bogotá a Honda, entre Guaduas y Honda, alt. 850-300 m, 5 Ago 1958 (fl), *H. García-Barriga* 16101 (COL, NY). **Sin localidad precisa:** N. Grenada, s.f. (fl), *Seeman s.n.* (GH).

TRINIDAD: Saint Ann's, 23 Sep 1922 (fl), *W.E. Broadway* 5202 (A, F, FI, G, MO); St. Anna, Fondes Amandes, 5 Nov 1931 (fl), *W.E. Broadway* 7848 (BM, FLAS, MO); (fl), *Crueger s.n.* (K); 1877-80 (fl fr), *A. Fendler* 640 (BM, K, NY); Cascade road, 6 Jun 1903 (fl), *J.R. Johnston s.n.* (GH); Santa Cruz rd. 100 ft, 9 May 1978 (fr), *M.B. Kallow B.1041* (NY); St. Ann, 5 Nov 1930 (fl fr), *Herb. E. Wall s.n.* (S); Feb 1932 (fl), *F.A.F.C. Went* 1060 (U).

ECUADOR: Guayas: Hda. Las Américas, s.f. (fl), *Fagerlind & Wibom* 360 (S); *ibid.*, 29 Sep 1952, *Fagerlind & Wibom* 400 (S). **Los Ríos:** Río Palenque Biological Station, Km 56 road Quevedo-Santo Domingo, 150-220 m, 2 Oct 1976 (st), *Dodson & Gentry* 6378, st (AAU, GB, MO, SEL), 150 - 220 m, 7 Oct 1976 (fr), 6537 (MO, SEL). **Pichincha:** Km 23 on the Santo Domingo-Puerto Limón road, in the Colorado community "Congoma Grande", 79°22' W, 0°21' S, 100 m, 23 Jul 1982 (st), *L.P. Kvist & E. Asanza* 40718 (AAU, QCA); Santo Domingo-Quevedo road Km 37, Hacienda Irena, 300 m, 22 Oct 1981 (fl), *L. Werling & S. Leth-Nissen* 525 (AAU, NY, QCA, QCNE, US).

Discusión

Aristolochia grandiflora difiere de las demás especies del subgénero, la sección y la subsección (subgénero *Aristolochia*, sección *Hexandrae*, subsección *Gymnolobus* Ducharte) por las dimensiones florales y la presencia de una cauda en el ápice del limbo. Además se diferencia

porque la curvatura floral ocurre con el flanco convexo dirigido hacia el sépalo medial, mientras que el flanco cóncavo se forma al frente de la comisura que dejan los dos sépalos laterales al fusionarse. Por lo tanto, la flor se dispone con el ápice hacia abajo y la base hacia arriba (Figs. 1-3, 4 a-i). En las demás especies del subgénero *Aristolochia*, incluidas especies caudadas como p. ej. *A. trilobata*, el flanco convexo se forma al frente de la comisura de los sépalos laterales, en tanto que el cóncavo se forma hacia el sépalo medial (Fig. 4 j-o; ver también **González & Stevenson**, 2000 a). La curvatura floral de *A. grandiflora* es igual a la que ocurre en las especies de los subgéneros *Isotrema*, predominantemente del Hemisferio Norte, con algunas especies en México y Centro América) y *Pararistolochia*, de África tropical y Australasia.

La flor de *Aristolochia grandiflora* es un ejemplo más que demuestra que la zigomorfía lateral (es decir, los procesos de desarrollo y crecimiento desiguales a lo largo de los flancos adaxial y abaxial de la flor que modifican el perfil del perianto) y la zigomorfía frontal (es decir, la que afecta únicamente al limbo floral lo que da como resultado un perianto monosimétrico) son procesos independientes. En las demás especies del subgénero *Aristolochia*, la zigomorfía del perianto es fundamentalmente similar a la que se presenta en *A. grandiflora*, pero la zigomorfía lateral ocurre de manera completamente opuesta (véase párrafo anterior). Dicha independencia se observa también en los subgéneros *Isotrema* y *Pararistolochia*, donde existen especies con zigomorfía lateral (similar a la de *A. grandiflora*), pero con perianto actinomorfo (para una discusión detallada al respecto, véase **González**, 1999 a, y **González & Stevenson**, 2000 a).

La presencia de cauda es una homoplasia en varias especies de *Aristolochia*; de hecho, se encuentran flores caudadas en especies de los tres subgéneros monofiléticos de *Aristolochia*; en el subgénero *Aristolochia* se encuentran flores caudadas en *A. grandiflora*, *A. hypoglauca* Kuhl., *A. mishuyacensis* O. C. Schmidt, *A. paulistana* Hoehne, *A. pohliana* Ducharte y *A. trilobata*, entre otras; en el subgénero *Isotrema* se encuentran flores caudadas en *A. tricaudata* Lem.; y en el subgénero *Pararistolochia* (*A. promissa* Mast., entre otras; cf. **Poncy**, 1978). En cuanto a la formación de la cauda, acá se demuestra que se trata de una fusión de los tres sépalos que, conjuntamente, forman dicho apéndice. Por lo tanto, la pregunta de si la cauda se forma por la fusión de dos sépalos (**Endress**, 1994) se resuelve en este escrito.

Varios autores han sobrevalorado las características morfológicas y las dimensiones del perianto al incluir a *Aristolochia grandiflora* en grupos tales como *Peltiflorae-*

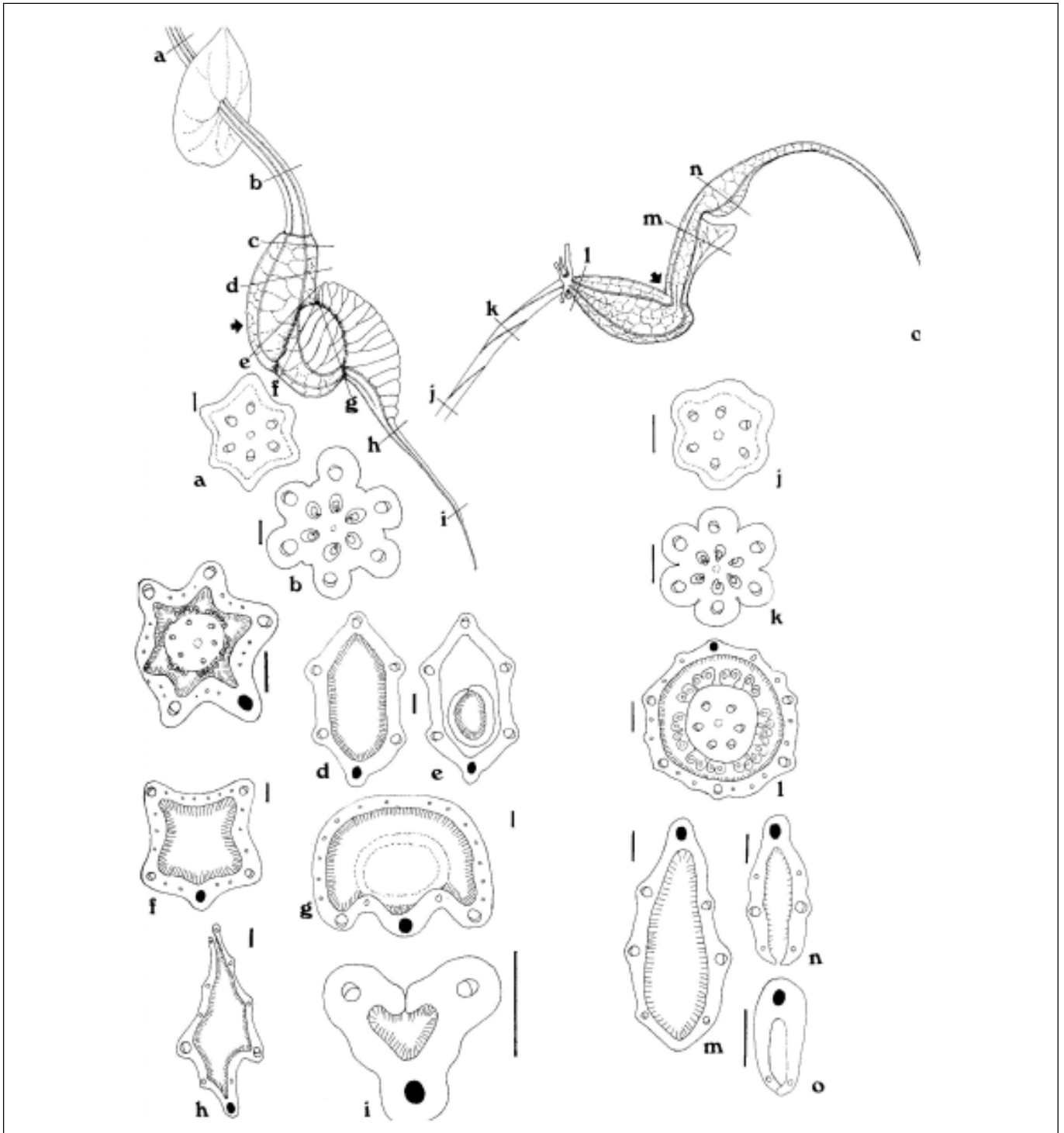


Figura 4. Diagrama comparativo de flores jóvenes (ca. 2 cm largo) de dos especies de *Aristolochia* con perianto caudado. **a-i.** *A. grandiflora*, secciones transversales a nivel de pedúnculo floral (**a**), ovario (**b**), utrículo y ginostemo (**c**), zona media del utrículo (**d**), zona distal del utrículo más siringe (**e**), zona media del tubo (**f**), zona distal del tubo más anillo (**g**), y zonas proximal (**h**) y distal (**i**) de la cauda. **j-o.** *A. trilobata* L., secciones transversales a nivel de pedúnculo floral (**j**), ovario (**k**), utrículo y ginostemo (**l**), zona distal del tubo (**m**), y zonas proximal (**n**) y distal (**o**) de la cauda. Las flechas y el haz vascular sombreado señalan la vena media del perianto, a lo largo del flanco convexo en *A. grandiflora*, y del flanco cóncavo en *A. trilobata*. Escala 0.5 mm.

Caudatae (Duchartre, 1854), *Sterigmaria* (Klotzsch, 1859) o *Subpeltiflorae-Macranthae* (Hoehne, 1942). Un nuevo grupo de caracteres morfológicos más consistentes para proponer las relaciones filogenéticas de esta especie han sido propuestos por González (1990, 1991, 1994, 1997, 1999 a, b) y González & Stevenson (2000 a, b, 2002).

Recientemente, y con base en algunas diferencias florales, se han descrito dos especies nuevas que pueden ser consideradas subespecies de *A. grandiflora*, (*A. gorgona* y *A. pichinchensis*) Sin embargo, no es claro si tales diferencias son suficientes para considerarlas especies debido a que, en el caso de *A. gorgona*, descrita de Costa Rica, ésta puede formar híbridos espontáneos con *A. grandiflora* (Blanco, 2005) y en el caso de *A. pichinchensis*, descrita del Ecuador, las características morfológicas intermedias se pueden encontrar entre las poblaciones centroamericanas y antillanas y las poblaciones de Ecuador. Vegetativamente *A. grandiflora* es afín a *A. schultzeana*, de la cual se distingue claramente por la morfología floral.

Si se comparan los recientes análisis filogenéticos que han incluido a *Aristolochia grandiflora*, su posición es inestable, dependiendo de si se basa en caracteres morfológicos (González 1997, 1999 a; González & Stevenson, 2002), moleculares (Neinhuis *et al.* 2005) o combinados (Wanke *et al.*, in press). Desafortunadamente, *A. grandiflora* no fue incluida en el análisis de Murata *et al.* (2001), lo cual impide una discusión más detallada al respecto. Por lo tanto, es necesario incorporar más caracteres en los análisis, a fin de obtener resultados más concluyentes acerca de sus relaciones filogenéticas. Varios caracteres morfológicos (flores bracteadas, semillas aplanadas, con rafe lineariforme) sugieren que *A. grandiflora* pueda tener una cercana afinidad, por un lado, con un grupo de especies del centro de Sudamérica, conformado por *A. burelae* Herzog, *A. lozaniaza* F. González, *A. lindneri* A. Berger, *A. stuckhertii* Speg. y *A. urbaniana* Taub. (González, 1999 a, b, 2001; Wanke *et al.* en prensa); por otro lado, con las especies pentandras de *Aristolochia* (un grupo de aproximadamente 40 especies del Sur de Estados Unidos, México, Norte de Centroamérica y Antillas Occidentales), las cuales también presentan flores bracteadas y la misma morfología externa de las semillas. Estos dos últimos grupos pueden ser clados hermanos, a juzgar por los recientes análisis filogenéticos presentados por Murata *et al.* (2001) y por Wanke *et al.* (en prensa).

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos al New York Botanical Garden y a los Royal Botanic Gardens, Kew,

por permitir el acceso a las colecciones vivas de *Aristolochia grandiflora*, y por el uso de las facilidades de microscopía electrónica. A.R. Bernal y G. Galeano por permitir la publicación de las fotografías en la fig. 2 B,C y a la Universidad Tecnológica del Chocó en el marco del proyecto Estudio de impacto ambiental, interconexión vial, Ánimas-Nuquí, y al Herbario Chocó. El presente trabajo hace parte del proyecto "Ontogenia y Filogenia; una aproximación comparativa a través del estudio del desarrollo floral en plantas colombianas", financiado a F. González y M.A. Bello por la Universidad Nacional de Colombia y por Colciencias (código 11010517595); por lo tanto, los autores agradecen el apoyo recibido por estas instituciones.

Bibliografía

- Acevedo-Rodríguez, P. 2003. Bejucos y plantas trepadoras de Puerto Rico e Islas Vírgenes. Smithsonian Institution Press, Washington, 491 pp.
- Blanco, M. A. 2002. *Aristolochia gorgona*, a new species with giant flowers from Costa Rica and Panama. *Brittonia* 54:30-39.
- . 2005. Un híbrido espontáneo entre *Aristolochia gorgona* y *A. grandiflora* (Aristolochiaceae). *Lankesteriana* 5: 115-117.
- Burgess, K. S., J. Singfield, V. Melendez & P. G. Kevan. 2004. Pollination biology of *Aristolochia grandiflora* (Aristolochiaceae) in Veracruz, Mexico. *Ann. Missouri Bot. Gard.* 91: 346-356.
- Cammerloher, H. 1923. Zur Biologie der Blüte von *Aristolochia grandiflora* Swartz. *Osterr. Bot. Z.* 72: 180-198, t. 5-7.
- Daumann, E. 1959. Zur Kenntnis der Blütennektarien von *Aristolochia*. *Preslia* 31: 359-372.
- Duchartre, P. 1854. Tentamen methodicae divisionis generis *Aristolochia*. *Ann. Sci. Nat. Bot. ser.* 4, 2: 29-76.
- Endress, P. K. 1994. Diversity and evolutionary biology of tropical flowers. Cambridge Univ. Press, 511 pp.
- González, F. 1990. *Aristolochiaceae*. Flora de Colombia. Monografía No. 12. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 184 pp.
- . 1991. Notes on the Systematics of *Aristolochia* subsect. *Hexandrae*. *Ann. Missouri Bot. Gard.* 78: 497-503.
- . 1994. *Aristolochiaceae*. Flora of Ecuador. Monograph No. 51.
- . 1997. Hacia una filogenia de *Aristolochia* y sus congéneres neotropicales. *Caldasia* 19: 93-108.
- . 1999a. A phylogenetic analysis of the Aristolochioideae (Aristolochiaceae). Ph. D. Dissertation. The City University of New York.
- . 1999b. Inflorescence morphology and the systematics of *Aristolochiaceae*. *Syst. Geogr. Pl.* 68: 159-172.

- _____. 2001. Una nueva especie de *Aristolochia* (Aristolochiaceae) de Bolivia. *Rev. Acad. Colomb. Ci. Exact. Fís. Nat.* 25: 225-228.
- _____ & **D. W. Stevenson**. 2000a. Perianth development and systematics of *Aristolochia*. *Flora* 195: 370-391.
- _____ & _____. 2000b. Gynostemium development in *Aristolochia* (Aristolochiaceae). *Bot. Jahrb.* 122: 249-291.
- _____ & _____. 2002. A phylogenetic analysis of the subfamily Aristolochioideae (Aristolochiaceae). *Rev. Acad. Colomb. Ci. Exact. Fís. Nat.* 26 (98): 25-60.
- Hilke, L.** 1984. Fenología y ecología floral de *Aristolochia grandiflora* Swartz (Aristolochiaceae) en Costa Rica. *Brenesia* 22: 1-44.
- Hoehne, F. C.** 1942. Aristolochiaceae. *Fl. Brasílica* 15(2): 3-141, t. 1-123.
- Klotzsch, F.** 1859. Die Aristolochiaceae des Berliner Herbariums. *Monatsber. Königl. Preuss. Akad. Wiss. Berlin* 1859: 571-625.
- Lee McFarling, U.** 1994. Nature's Vanishing pharmacy. *The Boston Globe*, Monday Oct 3: 25.
- Murata, J., T. Ohi-Thoma, S. Wu, D. Darnaedi, T. Sugawara, T. Nakanishi & H. Murata.** 2001. Molecular phylogeny of *Aristolochia* (Aristolochiaceae) inferred from *matK* sequences. *APG* 52:75-83.
- Neinhuis, C., S. Wanke, K. W. Hilu, K. Müller & T. Borsch.** 2005. Phylogeny of Aristolochiaceae based on parsimony, likelihood, and Bayesian analyses of *trnL-trnF* sequences. *Plant Syst. Evol.* 250: 7-26.
- Petch, T.** 1924. Notes on *Aristolochia*. *Ann. Royal Bot. Gard. Peradeniya* 8:1-108.
- Pfeifer, H. W.** 1977. A new ecuadorian dutchman's pipe, *Aristolochia pichinchensis*. *Selbyana* 2: 29-30.
- Poncy, O.** 1978. Le genre *Pararistolochia*, Aristolochiaceae d'Afrique tropicale. *Adansonia*, ser. 2, 17(4): 465-494.
- Wanke, S., F. González & C. Neinhuis.** 2006. Evolution of pipevines—Combining morphological and fast-evolving molecular characters to resolve the relationships within Aristolochioideae (Aristolochiaceae). *Int. J. Plant Sci.* (en revisión).

Recibido el 17 de marzo de 2006.

Aceptado para su publicación el 10 de abril de 2006.

PATRONES DE VARIABILIDAD DE LAS TEMPERATURAS SUPERFICIALES DEL MAR EN LA COSTA CARIBE COLOMBIANA

por

Gladys Bernal¹, Germán Poveda¹, Paola Roldán¹, Carlos Andrade²

Resumen

Bernal G., G. Poveda, P. Roldán & C. Andrade. Patrones de variabilidad de las temperaturas superficiales del mar en la Costa Caribe Colombiana. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **30** (115): 195-208. 2006. ISSN 0370-3908.

Se analizó la variabilidad espacio temporal de la temperatura superficial del mar (TSM) a lo largo de la zona costera del Caribe Colombiano, mediante el estudio de series de tiempo mensuales entre 1982 y 2000. El análisis abarcó la variación espacial con relación al ciclo anual, al fenómeno de El Niño – Oscilación Sur, la oscilación del Atlántico Norte (NAO), la tendencia de largo plazo y los dos chorros tropicales superficiales atmosféricos que afectan la climatología de la esquina noroccidental de Sudamérica (chorros superficiales de San Andrés y del Chocó). Se encontró una diferenciación entre los sectores suroccidental y nororiental del Caribe asociada con las piscinas cálida del SW (giro de Panamá-Colombia) y fría del NE (surgencias de la Guajira).

Palabras clave: temperatura superficial del mar (TSM), El Niño/Oscilación del Sur (ENSO), Caribe Colombiano, Chorro superficial de San Andrés, Chorro superficial del Chocó.

Abstract

The space – time variability of sea surface temperature (SST) along the Colombian Coastal Caribbean Zone was analyzed with monthly time series spanning the period 1982- 2000. Analyses included the spatial variability associated with the annual cycle, and interannual timescales associated with El Niño Southern Oscillation (ENSO), the North Atlantic Oscillation (NAO), as well as long-term trends. Analysis were included to study two tropical low-level atmospheric jets affecting the climatology of the north western corner of South America (the so-called “Choco” and “San Andres” low level jets). Two separate regions have been found along the Caribbean Sea to exhibit quite different climatic behavior: the southwestern region with a warm pool directly related to Panamá Colombia Gyre, and the northeastern region with a cold pool related to the Guajira upwelling system.

Key words: Sea surface temperature, El Niño/Southern Oscillation (ENSO), Colombian Caribbean, San Andres low level jet, Choco low level jet.

¹ Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. AA. 1027, Medellín. Correo electrónico: gbernal@unalmed.edu.co

² Grupo de Investigación en Oceanología, Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla”.

Introducción

La temperatura superficial del mar (TSM) es una de las variables oceanográficas más utilizadas como indicador ambiental por estar relacionada con aspectos físicos como corrientes marinas, intensidad de los vientos superficiales, dinámica de la capa de mezcla, precipitación e intensidad de la radiación solar, surgencias y cambios del nivel del mar. Por otro lado se relaciona con los ciclos de vida, metabolismo, factores poblacionales, estrés de los organismos, y en general con toda la variabilidad biológica relacionada con los factores físicos mencionados. Por esa razón, el estudio de la variabilidad espacial y temporal de la TSM en la Costa Caribe colombiana es importante y relevante desde los puntos de vista tanto físico y climático, como biológico y ambiental.

El patrón climático de la esquina al noroccidental (NW) de Sudamérica se encuentra controlado por la dominancia de corrientes de vientos en chorros superficiales atmosféricos (Arias, 2005), entre los que se distinguen la Corriente de los Andes Orientales (CAO, Montoya *et al.*, 2001), también conocida como Corriente de Bajo Nivel de Sudamérica (South America Low Level Jet, SALLJET, Liebmann *et al.*, 2004); el Chorro del Occidente Colombiano (chorro del CHOCO, Poveda, 1998; Poveda y Mesa, 1999, 2000) y el Chorro de San Andrés (Poveda, 1998; Poveda & Mesa, 1999), también denominado el chorro de bajo nivel del Caribe (Magaña *et al.*, 1999; Amador & Magaña, 1999). Los chorros superficiales tropicales son vientos con velocidades máximas entre los 900 y los 1000 hPa, asociados con fuertes gradientes de temperatura Océano-Tierra-Atmósfera (Hastenrath, 1991; Stensrud, 1996), de creciente interés en la investigación científica debido a su fuerte impacto sobre la superficie del mar y la tierra (South America Low Level Jet Experiment, <http://www.joss.ucar.edu/salljex/dm.html>).

La costa Caribe colombiana cubre un amplio rango latitudinal, comprendido entre 8° N hasta 13° N, desde el límite con Panamá en el suroeste (SW) en longitud 79° W, hasta la alta Guajira al noreste (NE) en longitud 71° W. En el Caribe colombiano el sistema climático se considera dependiente de los vientos alisios del NE y las oscilaciones de la Zona de Convergencia Intertropical (Vernette, 1985; Nystuen & Andrade, 1993). Mas específicamente, en este litoral se conjuga la acción de dos de los chorros superficiales, contrarios en su dirección, el chorro superficial de San Andrés y el chorro superficial del Chocó. El chorro de San Andrés, asociado directamente con los alisios de NE, está localizado entre la latitud 13 y 15° N, con un núcleo más intenso debajo de los 900 hPa, con veloci-

dades máximas mayores a 10 m/s en los trimestres de diciembre-enero-febrero (DEF) y junio-julio-agosto (JJA) y mínimas de 6 m/s en el trimestre septiembre-octubre-noviembre (SON). A su vez, el chorro del Chocó, localizado en 5°N, también de bajo nivel (850hPa), está asociado directamente con los alisios del SE sobre el océano Pacífico oriental, el cual es mínimo en el trimestre marzo-abril-mayo (MAM) con velocidades de 2 m/s y máximo en el trimestre SON, con velocidades de 6 m/s (Poveda, 1998). Además, éste último es el responsable de la advección de humedad desde el Pacífico sobre el continente y por tanto está directamente relacionado con los patrones de precipitación y la ocurrencia de Sistemas Convectivos de Mesoescala en Colombia (Poveda & Mesa, 2000), mientras que el chorro de San Andrés es responsable del clima seco sobre la región de la Guajira (Poveda, 1998), por la alta divergencia de humedad asociada con la dinámica del chorro.

La principal estación seca en el Caribe colombiano se presenta de diciembre a abril y la estación húmeda durante el resto del año, interrumpida por un mínimo relativo en julio y agosto conocido popularmente en Colombia como el “veranillo de San Juan” (Pujos & Le Tareau, 1988; Mesa *et al.*, 1997). La estación seca, así como el “veranillo”, están asociados con el chorro de San Andrés y los alisios del NE. Cuando el chorro de San Andrés es más fuerte se presenta la época seca en toda la costa Caribe que coincide con alisios del NE muy intensos. Asimismo, durante el “veranillo” el chorro de San Andrés presenta las velocidades más altas del ciclo anual. En cambio, la estación húmeda coincide con la época de mayor intensidad del chorro del Chocó y menor intensidad del chorro de San Andrés. A lo largo de toda la costa Caribe el mes más lluvioso del año es octubre y los más secos son febrero y marzo; sin embargo, hay una variación espacial importante de este parámetro. La zona SW, más cerca latitudinalmente del chorro del Chocó, es una región muy húmeda (el Golfo de Urabá presenta lluvias medias anuales de 4300 mm) y pasa transicionalmente hacia a una región desértica en el NE (la Guajira, con lluvias medias anuales de 460 mm). (Mesa *et al.*, 1997).

Las dominancias de las dos direcciones de alisios y por tanto de los chorros se relacionan con los desplazamientos de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). De diciembre a marzo, la ZCIT está localizada sobre Sudamérica y en el Caribe los centros de alta presión son fuertes y los vientos alisios del NE son máximos, lo que concuerda con la época seca principal en la región Caribe. De julio a septiembre la localización de la ZCIT cambia hacia el centro del Caribe, los vientos alisios se

debilitan y dominan vientos del SW que son más débiles pero pueden traer fuertes borrascas hacia la región del Caribe. (**Vernette**, 1985; **Andrade & Barton**, 2000). Estos períodos anuales coinciden con máximos en el chorro de San Andrés y del Chocó respectivamente. Sin embargo, el segundo máximo del chorro de San Andrés, que se presenta en julio-agosto asociado con el llamado “veranillo”, no está relacionado directamente con la ZCIT sino con una intensificación temporal del sistema de alta presión del Atlántico Norte (**Giannini et al.**, 2000). Algunos autores en Centroamérica han asociado el origen del “veranillo” (o canícula) con cambios de los vientos sobre la piscina caliente del Pacífico oriental (**Magaña et al.**, 1999a y b; **Waylen & Quesada**, 2001). Estos autores indican que el proceso para explicar el “veranillo” sobre México y Centroamérica podría ser diferente del mecanismo en el Caribe.

En la circulación general del mar Caribe colombiano se destacan la corriente Caribe, el centro de surgencias de la Guajira y el giro ciclónico de Panamá Colombia, localizado en el Golfo del Darién (**Fajardo**, 1979; **Dillon et al.**, 1988; **Andrade & Barton**, 2000, 2005; **Andrade et al.**, 2003). La contracorriente del Darién ha sido considerada como la porción costera del giro ciclónico de Panamá – Colombia. Constituye un contraflujo semi-continuo a lo largo de la margen continental desde Panamá hasta Venezuela. Esta contracorriente disminuye en intensidad hacia el E, desde 6 sv (1 sverdrup = $10^6\text{m}^3/\text{s}$) en Panamá hasta 1 sv en la Guajira. Esto es debido a que la mayor parte del transporte de la corriente recircula en el Giro ciclónico de Panamá-Colombia. En la Guajira, la contracorriente se sumerge para ser una corriente subsuperficial bajo el centro de surgencias, con el núcleo de máxima velocidad a 200 m de profundidad. La dinámica de la contracorriente – corriente subsuperficial está controlada principalmente por los vientos. Durante la época en la que los alisios del NE son máximos la surgencia de la Guajira es máxima y la contracorriente es subsuperficial, mientras que en la época húmeda sucede lo contrario y la contracorriente puede manifestarse en superficie a lo largo de toda la costa Caribe colombiana. (**Andrade & Barton**, 2000, 2005).

Sobre la variabilidad interanual de la TSM se ha mostrado que el Atlántico Nortropical y el Caribe experimentan anomalías positivas débiles durante los eventos El Niño (**Curtis & Hastenrath**, 1995; **Nobre & Shukla**, 1996, **Enfield & Mayer**, 1997), mucho más fuertes en los meses de marzo a mayo. Según **Poveda & Mesa** (1997) la TSM del Caribe tiene correlación con el SOI (Índice de la Oscilación del Sur), máxima con un desfase de 5 y 6 meses. Es

decir, las anomalías positivas de temperatura en el Caribe se presentan con un retraso respecto a los eventos de El Niño en el Pacífico.

Las asociaciones de la TSM con patrones climáticos y oceanográficos a escala anual e interanual permiten suponer que la definición de patrones temporales y espaciales de las series de TSM a lo largo de la costa Caribe Colombiana puede revelar o destacar puntos clave en el sistema climático de la esquina SW de Sudamérica. En el presente estudio se hace un análisis de las características de las TSM a lo largo de la costa Caribe colombiana con el fin de mostrar su variabilidad espacio temporal en relación con el sistema climático y oceanográfico de la región y buscar su relación con los dos chorros de la climatología colombiana. Para esto se presentan análisis de series mensuales a lo largo de la costa para los años comprendidos entre 1982 y 2000. Se muestran el ciclo anual y su variabilidad del SW al NE, así como un análisis de la variabilidad interanual y sus diferencias espaciales SW-NE.

Datos y métodos

Se usaron las series de temperatura superficial del “Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set” (COADS), base de datos 277 (**Reynolds & Smith**, 1994), con resolución mensual, correspondientes al período 1981- 2000. Se extrajeron las series mensuales de TSM para cuadrantes de $1^\circ \times 1^\circ$ sobre la costa colombiana, tal como se muestra en la Figura 1. A cada cuadrante se le asignó un nombre de acuerdo con su ubicación geográfica continental más cercana: Panamá, Morrosquillo, Cartagena 1, Cartagena 2, Ciénaga, Sierra, Baja Guajira y Alta Guajira. En los casos de Panamá, Morrosquillo y Baja Guajira se hicieron promedios de los datos de dos cuadrantes, previa comprobación de su consistencia espacial, ya que la línea de costa en estos sectores deja fragmentos de cuadrante poco representativos. Se efectuaron análisis estadísticos descriptivos de las series, se calcularon las medias de cada mes para obtener un ciclo anual promedio en cada localidad, se estimaron las correlaciones con índices de variabilidad climática globales tales como el SOI (índice de la Oscilación Sur, **Bjerknes**, 1969), el MEI (índice multivariado del ENSO, **Wolter & Timlin**, 1993; **Wolter & Timlin**, 1998) y la NAO (oscilación del Atlántico Norte, **Hurrell**, 1995; **Jones et al.**, 1997) y se compararon los ciclos estacionales de años de ocurrencia de El Niño, La Niña y normales. Los índices de variabilidad climática fueron obtenidos de la página web de la National Oceanic and Atmospheric Administration, (NOAA; www.noaa.gov/, www.cdc.noaa.gov/, www.cpc.ncep.noaa.gov/). Además se obtuvieron series de tiempo

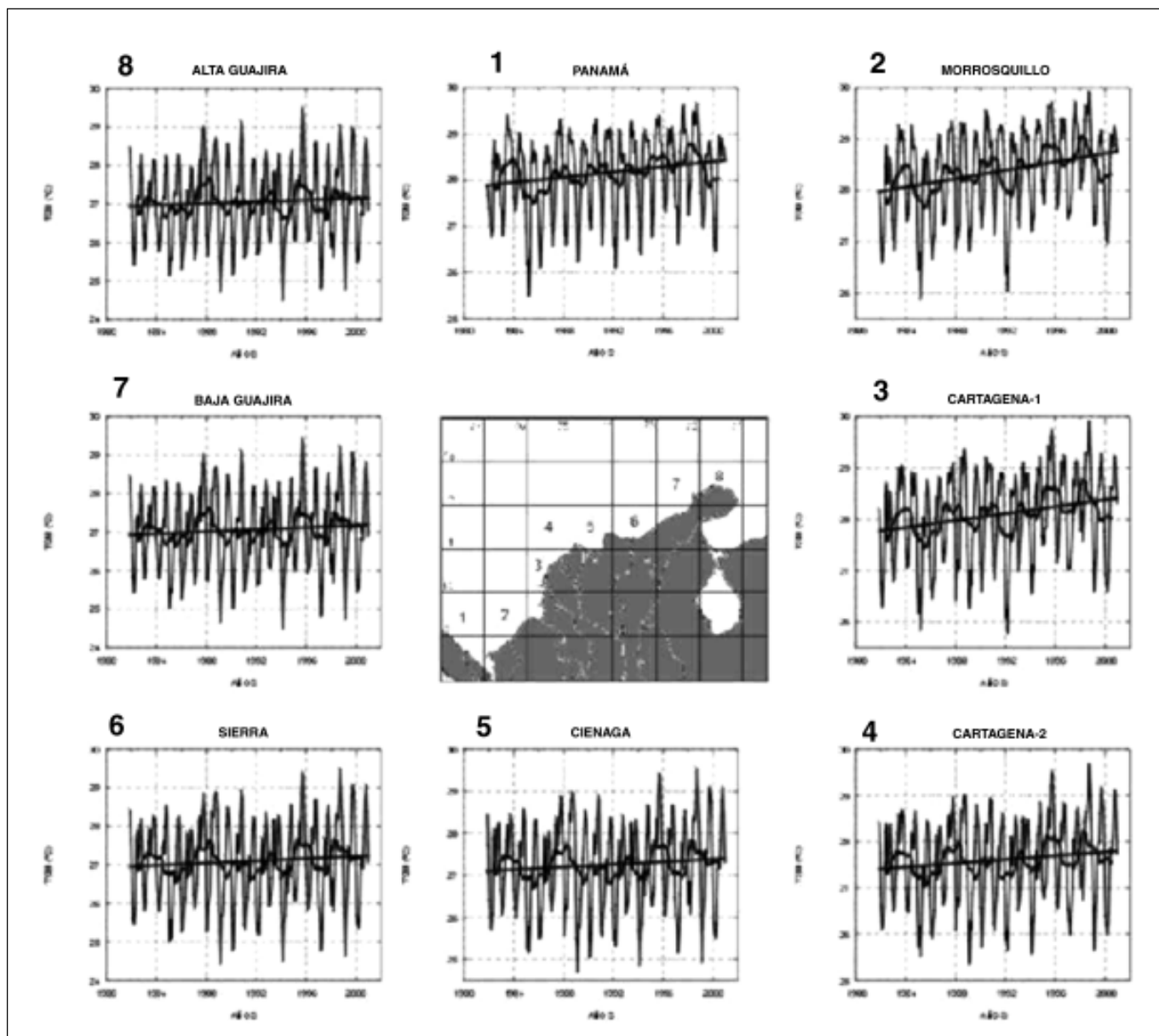


Figura 1. Series de tiempo de temperatura superficial del mar (TSM) y cuadrantes correspondientes. (1) Panamá (2) Morrosquillo (3) Cartagena 1 (4) Cartagena 2 (5) Ciénaga (6) Sierra (7) Baja Guajira (8) Alta Guajira. Las series se presentan con un filtro de 12 meses y la tendencia lineal.

de los vientos a 925 hPa del Reanálisis de NCEP-NCAR (Kalnay *et al.*, 1996) en regiones representativas del chorro de San Andrés (15°N, 72°W) y del chorro del Chocó (5°N, 80°W), que fueron correlacionadas con las series de TSM del Caribe colombiano.

Análisis de resultados

Según las series analizadas, el ciclo anual de la TSM en los distintos cuadrantes de la costa Caribe colombiana

(Figura 2) muestra una variabilidad consistente con la climatología y oceanografía de la región. Las temperaturas son bajas en la época seca, de diciembre a abril, cuando los vientos alisios y la surgencia en la Guajira son más fuertes. Las TSM son altas en la época húmeda, de mayo a noviembre, cuando los vientos alisios se encuentran débiles y la contracorriente del Darién al nivel superficial está más desarrollada. En la época húmeda hay un mínimo relativo centrado en agosto que coincide con el “veranillo” y que denominaremos enfriamiento de julio-agosto.

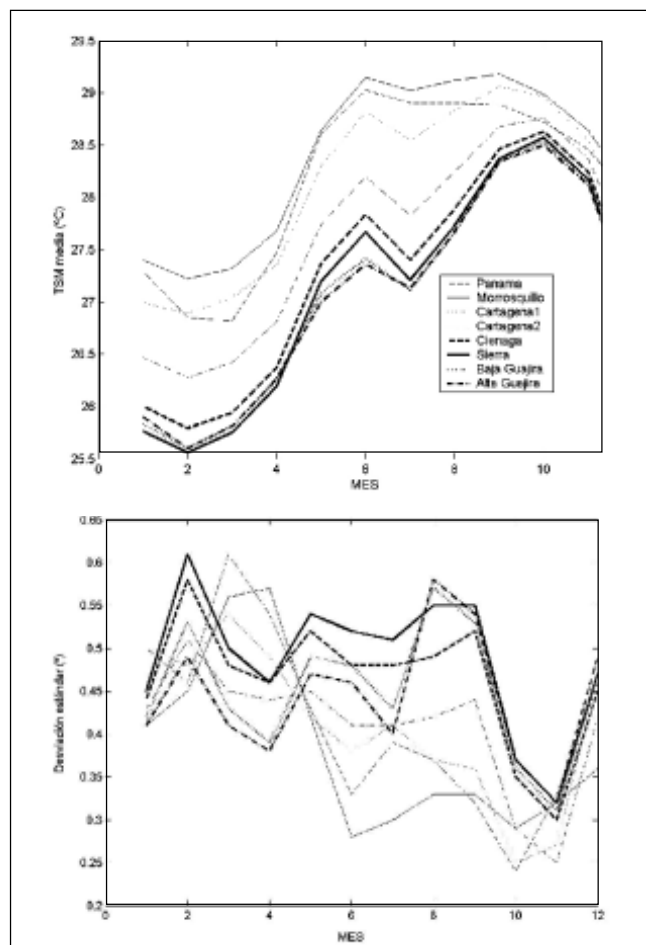


Figura 2. Ciclo medio anual de las series de TSM entre 1982 y 2000 (a) y desviación estándar de cada mes en los 19 años estudiados (b). Los ciclos se organizaron espacialmente con temperaturas más altas, menor intervalo anual y un enfriamiento julio-agosto menos definido hacia el SW. En las series del SW (líneas delgadas) la variabilidad fue mayor de diciembre a mayo y menor de junio a noviembre. En las series del NE la variabilidad fue alta en general excepto por los meses de octubre y noviembre.

La variabilidad espacial en el ciclo estacional está muy bien definida de SW a NE (Figura 2a y Tabla 1). Las series del SW presentaron temperaturas más altas que las del NE, menor amplitud anual y un enfriamiento de julio-agosto menos intenso. En la Figura 2a se observa que los ciclos estacionales se agrupan espacialmente. Un primer grupo, más cálido, está conformado por las series del SW, Panamá, Morrosquillo y Cartagena 1. Un segundo grupo, más frío, está conformado por las series del NE, Ciénaga, Sierra, Baja y Alta Guajira. La serie de Cartagena 2, al centro de la región, se comportó de forma intermedia. La principal diferencia entre los dos grupos ocurre en los meses secos, de más baja TSM, cuando se presentan surgencias en el extremo NE del Caribe colombiano. En los meses de alta TSM, especialmente octubre y noviembre, las temperaturas a lo largo de toda la costa se observan más homogéneas. La mayor variabilidad en las series a lo largo de la costa, calculada por la desviación estándar del promedio mensual, se presentó para los meses de enero, febrero y junio ($ds > 0.7$), y la menor variabilidad a lo largo de la costa en los meses de octubre y noviembre ($ds < 0.25$).

La variabilidad interanual de cada mes observada a partir de la desviación estándar de las TSM en los 19 años de las series (Figura 2b), mostró que en general los meses de TSM mínima, febrero y marzo, tuvieron mayor variabilidad y los meses de TSM máxima, octubre y noviembre, menor variabilidad. También se nota un patrón espacial donde las series del NE (Sierra, Alta y Baja Guajira) muestran alta variabilidad en los meses del enfriamiento de julio-agosto hasta septiembre. Los patrones interanuales de variabilidad mensual de las series de Morrosquillo y Cartagena 1 mostraron diferencias con respecto a las demás series con el pico de máxima variabilidad en los meses de marzo abril (para las demás series este pico se concentra en febrero) y variabilidad mínima de junio a diciembre.

Tabla 1. Estadística descriptiva de las series de TSM

| | Serie | TSM media | TSM mínima | TSM máxima | Intervalo anual |
|----|--------------|-----------|------------|------------|-----------------|
| SW | Urabá | 28.16 | 25.51 | 29.69 | 4.18 |
| | Morrosquillo | 28.37 | 25.89 | 29.93 | 4.04 |
| | Cartagena 1 | 28.09 | 25.80 | 29.92 | 4.12 |
| | Cartagena 2 | 27.60 | 25.35 | 29.69 | 4.34 |
| NE | Ciénaga | 27.25 | 24.70 | 29.57 | 4.87 |
| | Sierra | 27.09 | 24.43 | 29.50 | 5.07 |
| | Baja Guajira | 27.06 | 24.50 | 29.45 | 4.95 |
| | Alta Guajira | 27.05 | 24.50 | 29.54 | 5.04 |

Para determinar los cambios en el ciclo anual durante años de El Niño y La Niña, se cuantificaron las TSM mensuales de los años El Niño ocurridos durante el período de estudio (82-83, 86-87, 91-92, 94-95, 97-98) y los años La Niña (88-89, 98-99, 99-00) para cada serie, según el año hidrológico definido de junio del año 0 a mayo del año +1. Como ilustración se presentan las dos series extremas, la de Panamá que representa el grupo del SW y la de la Alta Guajira que representa el grupo NE (Figura 3). Se encontró que en el NE (serie de Alta Guajira) las anomalías de TSM durante los eventos El Niño fueron negativas al comienzo del año hidrológico, entre los meses de junio a octubre, con un enfriamiento de julio-agosto más marcado, y positivas en la época seca, especialmente de enero a abril. Por el contrario, durante los eventos La Niña las anomalías de temperatura fueron positivas en la primera mitad del año hidrológico y negativas en la época seca. En cambio en el SW (serie de Panamá), en la primera mitad de año hidrológico no se manifestaron anomalías características de El Niño o La Niña y sólo en marzo, abril y mayo del año +1 los ciclos de años El Niño se diferenciaron de los años La Niña con anomalías positivas de temperatura. Los años normales tuvieron un comportamiento intermedio entre estos dos extremos.

Las correlaciones cruzadas entre el MEI y las series de TSM estandarizadas (no mostradas) indicaron que todas las series presentan un rezago de 7 meses con respecto al índice de El Niño, con valores positivos significativos entre 0.35 y 0.44. Correlaciones mayores que 0.4 se presentan en las series de Panamá y Cartagena 2. Todas las correlaciones fueron estadísticamente significativas en un 95%. Por su parte, las correlaciones cruzadas con el SOI (Figura 4) fueron menores, con valores negativos entre 0.21 y 0.3, estadísticamente significativos. Los rezagos de las series con respecto al SOI mostraron un patrón espacial definido, donde la primera serie que respondió fue La Guajira con un retraso de 5 meses, que pasó a 6 meses en las series de Morrosquillo y Panamá. Los mayores valores de la correlación se presentaron en Panamá nuevamente. Las correlaciones cruzadas mensuales del NAO con las series de temperatura (no mostradas) indicaron correlaciones estadísticamente significativas con valores muy bajos. Fueron máximas y negativas para un rezago de 0 meses, con valores entre -0.16 y -0.20 . Sólo en Panamá el máximo se presentó para un rezago de 1 mes.

Para el análisis estacional, se calcularon las correlaciones de las series de los promedios trimestrales para cuatro épocas del año: diciembre-enero-febrero (DEF), marzo-abril-mayo (MAM), junio-julio-agosto (JJA) y sep-

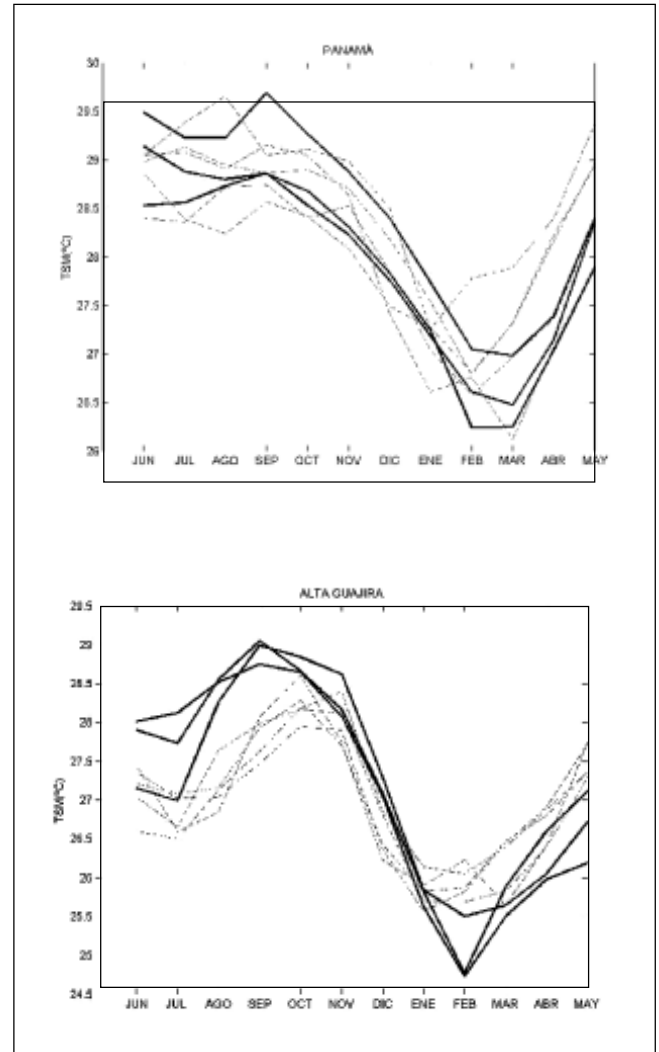


Figura 3. Ciclo anual para el año hidrológico (de junio del año 0 a mayo del año +1) de los eventos Niño (línea punteada) y Niña (línea continua gruesa) para dos localidades extremas del Caribe colombiano: Panamá y Alta Guajira. En Panamá (extremo SW) durante eventos cálidos (Niño) sólo hubo anomalías positivas de temperatura visibles en marzo, abril y mayo del año +1, mientras que en la Guajira (extremo NE) hubo anomalías negativas de junio a octubre del año 0 con un enfriamiento de julio-agosto más marcado y anomalías positivas en la época seca, de enero a abril del año +1.

tiembre-octubre-noviembre (SON). Nuevamente las mayores correlaciones con El Niño se encontraron para el índice MEI. Las mayores correlaciones significativas de las series trimestrales entre el MEI y las TSM se obtuvieron para DEF con MAM, respectivamente, con valores de 0.4 y 0.5 para las series del SW y de 0.7 para las demás (Figura 5). Para DEF y JJA (junio-julio-agosto) las correlaciones en todas las estaciones fueron de 0.5 con excepción de Panamá (0.6) y Morrosquillo (0.4). Entre el NAO y

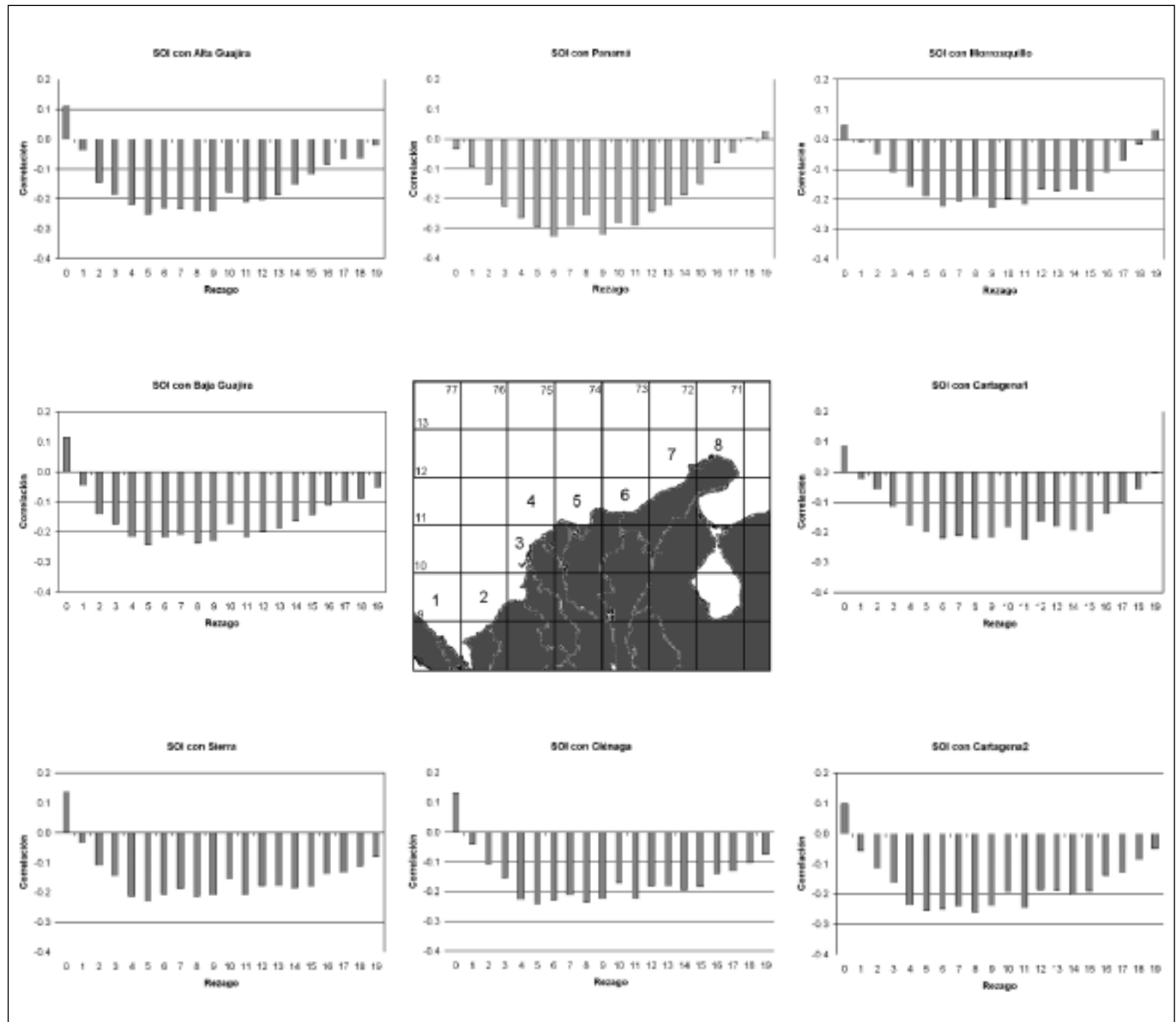


Figura 4. Correlaciones cruzadas entre las series de TSM y el SOI. El rezago de la máxima correlación fue menor para las series del NE (5 meses) y mayor para las series extremas del SW (6 meses).

las TSM las mayores correlaciones de las series trimestrales se obtuvieron para MAM del NAO con JJA de las TSM, con valores entre -0.4 y -0.5, estadísticamente significativas (95%), con excepción de la serie de la Alta Guajira y Morrosquillo (Figura 6).

Las tendencias de largo plazo se visualizaron en las tendencias lineales de las series (Figura 1) y en la gráfica de las medias anuales (Figura 7). Se encontró nuevamente la agrupación de las series del SW, más cálidas, las series del NE, más frías, y la serie de Cartagena 2 con

un comportamiento intermedio. En las series del SW fue evidente una tendencia creciente en la temperatura media anual, estimada del orden de 0.6°C en los 19 años estudiados. Esta tendencia no se presentó en las series del NE. Además de la evidencia gráfica, tres pruebas estadísticas de tendencia lineal (prueba T para detección de tendencias lineales, prueba de Mann-Kendall y prueba de Sen) indicaron una tendencia de largo plazo significativa al 95% en las series Panamá, Morrosquillo y Cartagena 1.

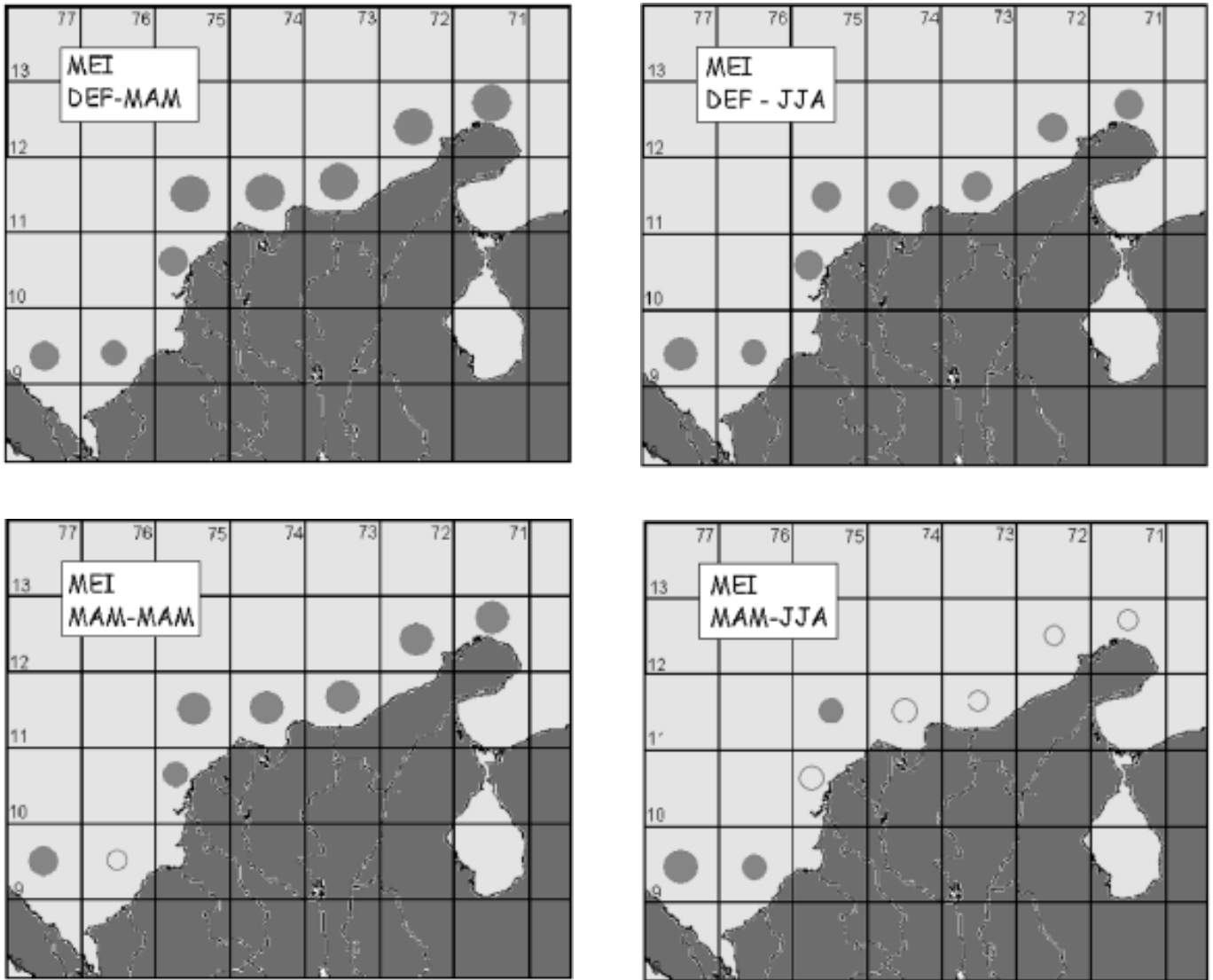


Figura 5. Correlaciones trimestrales entre el MEI y las series de TSM. El tamaño del círculo representa el valor de la correlación, desde 0.4 el más pequeño, hasta 0.7 el mayor. Círculos rellenos indican valores significativos al 95%, los círculos vacíos indican valores no significativos.

La comparación entre los ciclos anuales de TSM con las series de la componente zonal de la velocidad del viento de los dos chorros superficiales de viento en el Caribe colombiano (Figura 8) mostró que el ciclo anual del chorro de San Andrés es inverso al ciclo anual de las TSM en las series del NE para los meses entre julio y diciembre. En cambio el ciclo anual del chorro del Chocó corresponde de manera directa con las TSM, especialmente en las series del NE. Cuando no se considera el ciclo anual, la relación entre las series de vientos en el núcleo de los chorros y las TSM es diferente (Tabla 2). Por ejemplo, las correlaciones de las series de vientos y temperaturas completas (incluido el ciclo anual) fueron positivas y muy

altas para el chorro del Chocó y negativas y más bajas para el chorro de San Andrés, el cual no mostró ninguna relación con las temperaturas del SW. La misma correlación entre las series estandarizadas por el ciclo anual indicó que la única correlación significativa se presenta inversa entre el chorro de San Andrés y las TSM del NE.

Las correlaciones de los promedios trimestrales (DEF, MAM, JJA, y SON) de los vientos en los núcleos de los chorros y las TSM extremas de la Guajira, y Panamá (Tabla 3) revelaron que las TSM en la piscina cálida SW tienen más relación con el chorro del Chocó que con el de San Andrés. Cuando el chorro del Chocó fue más intenso,

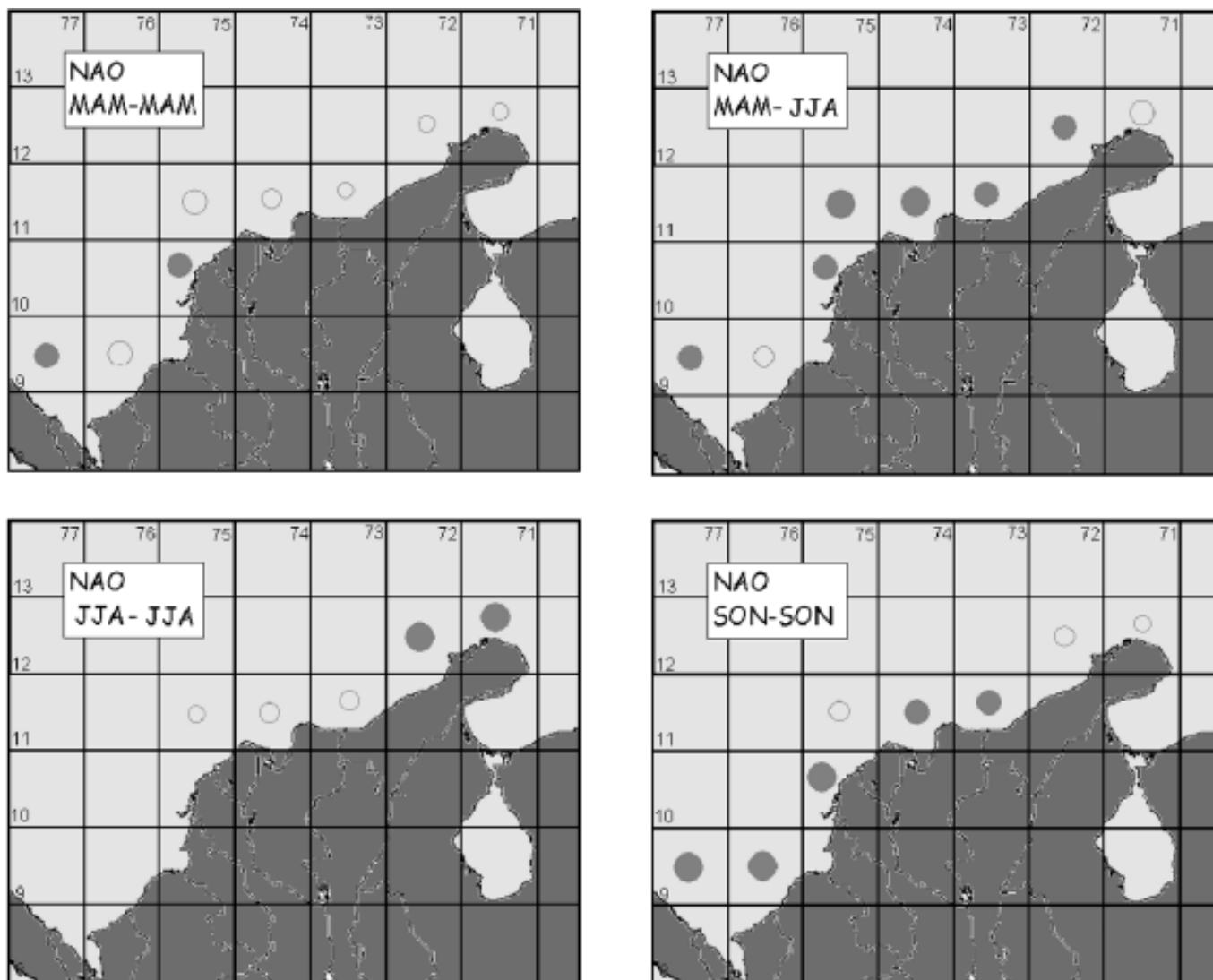


Figura 6. Correlaciones trimestrales entre el NAO y las series de TSM. El tamaño del círculo representa el valor de la correlación, desde -0.2 el más pequeño, hasta -0.4 el mayor. Círculos rellenos indican valores significativos al 95%, los círculos vacíos indican valores no significativos.

Tabla 2. Coeficientes de correlación entre las series de TSM y rapidez de los vientos zonales en el núcleo de los chorros del Chocó y San Andrés. Los valores resaltados son estadísticamente significativos en un 95%. Las dos primeras columnas corresponden a las series originales y las dos últimas a las series estandarizadas por el ciclo anual.

| SERIE TSM | U CHOCÓ | U SAN ANDRÉS | U CHOCÓ | U SAN ANDRÉS |
|--------------|-------------|--------------|---------|--------------|
| Panamá | 0.69 | -0.01 | -0.1 | -0.02 |
| Cartagena 2 | 0.76 | -0.35 | 0.02 | -0.44 |
| Alta Guajira | 0.78 | -0.45 | 0.07 | -0.48 |

en JJA y SON, el agua en la esquina SW del Caribe fue más fría en SON. La intensidad del chorro del Chocó en DEF también tuvo relación con las TSM en toda la costa (JJA y SON en el extremo SW, MAM y JJA en el extremo NE). La

intensidad del chorro de San Andrés en DEF afectó la TSM de la piscina cálida del SW en DEF y MAM. Esta parece ser la única influencia de este chorro en el extremo SW. En cambio, la influencia sobre la piscina fría de la Guajira

Tabla 3. Correlaciones entre las series trimestrales estandarizadas por su ciclo anual (DEF, MAM, JJA, SON) de los vientos zonales en los núcleos de los chorros (U CH=Chocó, U SA=San Andrés) y las TSM extremas (PAN=Panamá, AG=Alta Guajira). Los valores resaltados son significativos en un 90%.

| | DEF TSM PAN | MAM TSM PAN | JJA TSM PAN | SON TSM PAN |
|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| DEF U CH | 0.20 | -0.29 | -0.51 | -0.49 |
| MAM U CH | | 0.02 | -0.29 | -0.33 |
| JJA U CH | -0.45 | | -0.32 | -0.42 |
| SON U CH | -0.29 | -0.35 | | -0.45 |
| | DEF TSM AG | MAM TSM AG | JJA TSM AG | SON TSM AG |
| DEF U CH | 0.25 | -0.56 | -0.43 | -0.25 |
| MAM U CH | | 0.08 | 0.00 | 0.04 |
| JJA U CH | -0.13 | | 0.18 | 0.37 |
| SON U CH | -0.16 | -0.12 | | 0.04 |
| | DEF TSM PAN | MAM TSM PAN | JJA TSM PAN | SON TSM PAN |
| DEF U SA | -0.64 | -0.45 | -0.19 | -0.16 |
| MAM U SA | | -0.01 | -0.18 | -0.02 |
| JJA U SA | -0.11 | | -0.21 | -0.14 |
| SON U SA | 0.09 | 0.23 | | 0.17 |
| | DEF TSM AG | MAM TSM AG | JJA TSM AG | SON TSM AG |
| DEF U SA | -0.70 | -0.04 | -0.07 | -0.09 |
| MAM U SA | | -0.69 | -0.35 | -0.01 |
| JJA U SA | 0.10 | | -0.58 | -0.43 |
| SON U SA | -0.09 | 0.49 | | -0.69 |

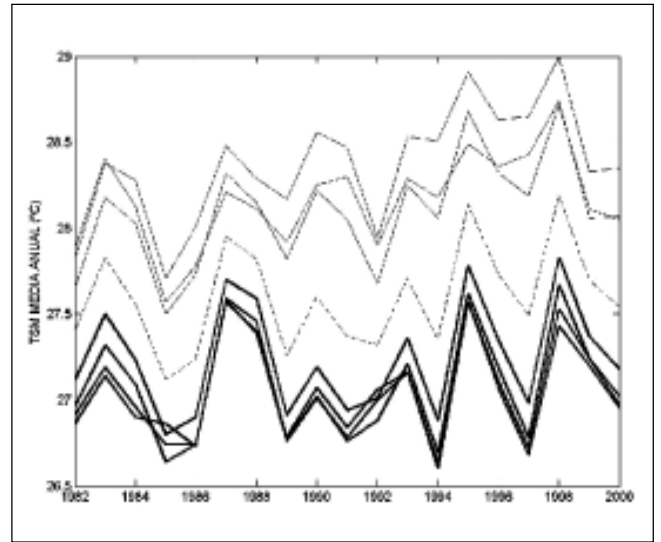


Figura 7. Medias anuales de TSM. Línea continua delgada: grupo de series del SW (Panamá, Morrosquillo, Cartagena 1). Línea continua gruesa: grupo de series del NE (Ciénaga, Sierra, Baja y Alta Guajira). Línea discontinua: serie intermedia (Cartagena 2).

fue muy fuerte e inmediata en los cuatro trimestres del año. El viento del chorro de San Andrés durante el “veranillo” (JJA) también afectó la TSM en la Guajira el siguiente trimestre (SON).

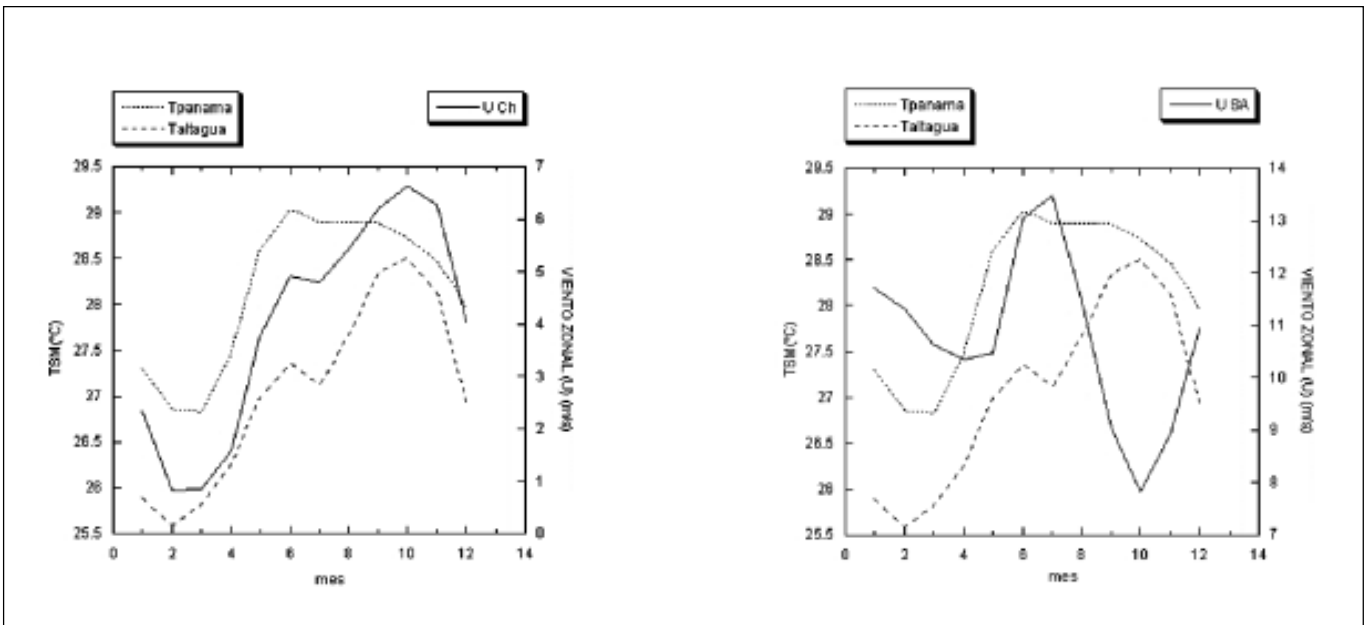


Figura 8. Comparación entre el ciclo anual de la intensidad de los Chorros del Chocó y San Andrés (representados por el ciclo anual de la velocidad zonal de los vientos en 925 hPa, coordenadas 15°N, 72°W para el chorro de San Andrés y 5°N, 80°W para el chorro del Chocó) y el ciclo anual de las TSM en Panamá y Alta Guajira.

Discusión

El agrupamiento de las series del SW y del NE está relacionado con la oceanografía costera (piscina cálida al SW controlada por el giro de Panamá Colombia y piscina fría al NE controlada por surgencias costeras) y la orientación de la línea de costa. Las series del NE pertenecen a localidades donde la línea de costa tiene una orientación NEE directamente expuestas a la acción de los vientos alisios del NE (chorro de San Andrés) y sometidas a un centro de surgencias, lo que las hace más frías y con una variabilidad anual mayor. Las series del SW están en localidades con dirección de línea de costa NNE, de cierta forma protegidas de los vientos, que no presentan surgencias y están más afectadas por la influencia continental de ríos y oceanográficamente por el giro ciclónico de Panamá Colombia. Estas series fueron más cálidas y con una variabilidad anual menor. La serie más cálida, en el golfo de Morrosquillo, pertenece a la zona donde la plataforma continental de la costa Caribe es más amplia, lo que pudo permitir un calentamiento local de las aguas más intenso. La variabilidad de la ZCIT que permite la llegada de sistemas atmosféricos del NE y el SW, es una razón más para el gradiente espacial encontrado en las series de tiempo.

Ahora bien, la variabilidad interanual fue mayor para los meses de la estación seca que para los meses de la estación húmeda. Asimismo, en la estación húmeda se hacen homogéneas las TSM a lo largo de la costa, mientras que en la estación seca el gradiente se hizo más marcado. Este comportamiento concuerda con la supresión de las surgencias, intensificación del giro Panamá Colombia y superficialización de la contracorriente del Darién en la época húmeda y con las surgencias del NE durante la época seca (Andrade *et al.*, 2003; Andrade & Barton, 2005).

Los años de El Niño y la Niña se manifestaron en las series con anomalías positivas y negativas, tal como se esperaba según trabajos anteriores (e.g. Poveda & Mesa, 1997). El rezago en las TSM del Caribe con respecto a ENOS fue mayor en las series del SW, es decir, la señal debida al ENOS se comenzó a sentir primero en las series del NE. También las anomalías positivas de TSM sólo se encontraron en la estación seca y fueron mucho más claras en las series del NE. Como vimos, esta estación es la más susceptible a cambios interanuales. En las series del NE también se observó un enfriamiento característico en la estación húmeda durante años de El Niño (año 0), posiblemente causado por la intensificación del viento.

Sin embargo, según las correlaciones trimestrales entre los vientos y las TSM encontradas en este estudio, las anomalías en el chorro del Chocó pueden explicar las anomalías positivas en las series del SW en MAM del año +1. En cambio, las anomalías de las series del NE no pueden ser explicadas por su comportamiento con respecto a los vientos. De acuerdo con Poveda (1998, fig. 2.33) la diferencia en la velocidad del viento en los chorros atmosféricos superficiales colombianos entre eventos cálidos (El Niño) y fríos (La Niña) revela que en MAM ambos chorros son más fuertes durante eventos El Niño. En JJA y SON ambos chorros se debilitan en años El Niño con respecto a años La Niña, especialmente el chorro de San Andrés. Y en DEF, mientras el chorro del Chocó se debilita en años Niño el chorro de San Andrés se intensifica. Las TSM del NE fueron inversas a la intensidad del chorro de San Andrés en todos los trimestres del año. Si los vientos en San Andrés se debilitan en JJA y SON de años El Niño, las TSM deberían presentar anomalías positivas en estos trimestres de años El Niño, y fueron negativas. Precisamente en JJA y SON se encontró la mayor relación entre las TSM y la NAO. El efecto de la oscilación del Atlántico Norte sobre los eventos en el Caribe durante estos meses pudo afectar en mayor medida que el ENOS la respuesta de las TSM.

Precisamente de julio a septiembre se presenta el mínimo relativo, acorde con el llamado “veranillo”, mucho más pronunciado en las series del NE. Esta es la época de mayor energía rotacional del viento en el Caribe (Nystuen & Andrade, 1993). Asimismo, la mayoría de los huracanes más intensos en el Atlántico y el Caribe ocurren en agosto, septiembre y octubre (Landsea *et al.*, 1999) y en Colombia, en septiembre y noviembre se presentan con mayor intensidad los llamados “mares de leva” (Vernette, 1985). Lo que se observó en las series de TSM del Caribe colombiano es que durante años de El Niño el enfriamiento debido al “veranillo” es más intenso en las series del NE que durante años de La Niña (año 0 y +1). Se ha comprobado que durante los años de El Niño la generación de tormentas tropicales en el Caribe disminuye con respecto a los años Niña o normales (Gray & Sheaffer, 1991; Magaña *et al.*, 1999b). Es curioso, que si los huracanes están asociados con altas temperaturas del mar, no se intensifiquen durante años de El Niño, cuando hay anomalías positivas de TSM. Posiblemente la respuesta está en la energía del viento. Los trimestres JJA y SON coinciden con la época de mayor intensidad del chorro de San Andrés (JJA) y del Chocó (SON). De acuerdo con Poveda (1998) en JJA y SON ambos chorros se debilitan en años El Niño con respecto a años La Niña. Esta menor energía del viento durante años Niño en el trimestre del “veranillo”

puede ser responsable de la menor ocurrencia de huracanes en el Caribe. Lo que no está claro es por qué, si durante el Niño se debilita el chorro de San Andrés en JJA, se presenta un enfriamiento más marcado en el agua.

La tendencia de calentamiento de largo plazo sólo fue evidente en las series del SW. Estas series fueron las más cálidas y las de menor variabilidad en el ciclo anual estacional e interanual (entre eventos El Niño y La Niña). Un calentamiento de largo plazo de esta zona ha sido señalado por otros investigadores con respecto al aumento del nivel del mar. **Pabón** (2003) indica aumentos del nivel del mar para el Caribe colombiano del orden de 1-2 mm por año, mayor para el SW. **González et al.** (1997) analizaron un total de 80 estaciones de mareógrafos en el mar Caribe y Golfo de México y encontraron que el ascenso máximo del nivel del mar en el Caribe se presentaba en Cartagena, con un valor de 5.3 ± 0.1 mm por año en una serie de 42 años (registran la media para el Caribe en 2 mm por año). Sin embargo, el hecho de que este calentamiento no fuera evidente en las series del NE puede indicar que este proceso de largo plazo tiene su origen en la esquina SW del Caribe, asociado con la piscina cálida y el giro ciclónico de Panamá Colombia.

Hay que considerar que los resultados fueron obtenidos a partir de datos de viento producidos por un Reanálisis Climático que no tuvo en cuenta datos del Caribe y Pacífico colombianos, porque no se han realizado estas mediciones. Asimismo, los datos de TSM provienen de mediciones satelitales calibradas con observaciones in situ de boyas y barcos. En Colombia no se han implementado sistemas de medición continuos de variables oceanográficas, por lo cual la calibración en nuestras aguas es más pobre que en otras localidades. El hecho de que los resultados sean consistentes y comparables con otras investigaciones indica que si existen los patrones encontrados en los datos. Sin embargo, estos podrían ser mucho más precisos y exactos si se implementan sistemas de medición adecuados en el sistema Océano – Atmósfera del territorio colombiano.

Conclusiones

El análisis de las TSM de la costa Caribe colombiana entre 1982 y 2000 reveló una diferenciación espacial en las escalas anual e interanual entre dos componentes extremos: la piscina cálida en el SW y la piscina fría en el NE. Las aguas del SW fueron más cálidas, con un intervalo anual menor, no presentaron enfriamiento de julio-septiembre, tuvieron una marcada tendencia de largo plazo al calentamiento y mostraron mayor relación con el chorro de viento bajo del Chocó que con el de San Andrés. Además

su respuesta a ENOS fue más tardía (rezago de 6 meses), las anomalías positivas de TSM no fueron marcadas y se presentaron principalmente en el trimestre MAM del año +1. La correlación trimestral con el MEI fue mucho más baja que para el grupo del NE y fue mayor en MAM y JJA.

Las aguas del NE fueron más frías, presentaron un intervalo anual menor con mayor variabilidad interanual, un enfriamiento de julio-septiembre más marcado y sin tendencia de calentamiento de largo plazo. Las TSM estuvieron inversamente relacionadas con el chorro de viento bajo de San Andrés y respondieron a la intensidad del viento de manera inmediata. Tuvieron mayor relación con los eventos ENOS del Pacífico, con un rezago de 5 meses y altas correlaciones trimestrales (0.7 con MEI), especialmente para el trimestre MAM.

Las anomalías de TSM durante eventos El Niño tuvieron un comportamiento espacial diferenciado. Para las series del SW sólo se presentan ligeras anomalías positivas en MAM del año +1, mientras que para las series del NE se presentan anomalías negativas al principio del año hidrológico (JJA y SON del año 0) y positivas al final (DEF y MAM año 0 y +1). En las series del NE se encontró que el enfriamiento de julio-septiembre fue más marcado durante años El Niño. Este enfriamiento al principio del año hidrológico no pudo ser explicado por la rapidez del viento en el núcleo de los chorros. Las anomalías de años Niño en las series del SW pueden explicarse por la relación con los chorros, no así las de las series del NE.

La correlación de las series con el índice NAO mostró que aunque baja, hay relación entre ellas. Mayor en el trimestre JJA para las series del NE y en SON para las series del SW. La mayor correlación en estos trimestres y la relación de la climatología del Atlántico Norte en la ocurrencia del “veranillo” reveló que la NAO puede ser clave en el entendimiento de las anomalías de TSM en años Niño no explicadas y en la ocurrencia de huracanes en el Caribe.

El aumento sostenido de la TSM en el SW del Caribe colombiano parece estar relacionado con la persistencia de la circulación ciclónica del giro Panamá-Colombia en ese sector.

Agradecimientos

A la NOAA, NCEP/NCAR, y COADS por las bases de datos que hicieron posible este análisis. Especialmente al Scientific Computing Division's Data Support Section, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, por las series de temperatura superficial del mar

de Reynolds, Stoke and Smith. A las Ingenieras Paola Andrea Arias y Catalina Goez por su colaboración con la obtención de las series de velocidad del viento del Reanálisis NCEP-NCAR y los análisis de tendencias lineales. A todos los colegas y amigos que colaboraron con sus comentarios y sugerencias.

Bibliografía

- Amador, J. A., & V. Magaña.** 1999. Dynamics of the low level jet over the Caribbean, 23th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, AMS., Dallas, 868-869.
- Andrade, C.A. & Barton, E.D.** 2005. The Guajira Upwelling System, *Continental Shelf Research*, 25, (9), 1003-1022.
- _____. 2000. Eddy development and motion in the Caribbean Sea. *Journal of Geophysical Research*, **105**(C11): 26,191-26,201.
- Andrade, C.A., E.D. Barton & C.N.K. Mooers.** 2003. Evidence for an eastward flow along the Central and South American Caribbean Coast. *Journal of Geophysical Research*, **108**(C6), 11 p.
- Arias, P. A.** 2005. Diagnóstico y predicción de la variabilidad intra-anual de la hidrología colombiana. Tesis de grado, Magíster en Ingeniería – Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 192 p.
- Bjerknes, J.** 1969. Atmospheric teleconnections from the Equatorial Pacific. *Mon. Wea. Rev.* 97: 163-172.
- Curtis, S. & S. Hastenrath.** 1995. Forcing of anomalous sea surface temperature evolution in the Tropical Atlantic during Pacific warm events. *Journal of Geophysical Research*, **100** (C8): 15835-15847.
- Dillon, W.P., N.T. Edgar, K.M. Scanlon & K.D. Klitgord.** 1988. *Geology of the Caribbean*. Oceanus, 30 (4): 42-52.
- Enfield, D.B. & D.A. Mayer.** 1997. Tropical Atlantic sea surface temperature variability and its relation to El Niño – Southern Oscillation. *Journal of Geophysical Research*, 102 (C1): 929-945.
- Fajardo, E.G.G.** 1979. Surgencia costera en las proximidades de la Península colombiana de la Guajira. *Boletín Científico del CIOH*. p. 7-19.
- Giannini, A., Y. Kushnir & M.A. Cane.** 2000. Interannual variability of Caribbean rainfall, ENSO and the Atlantic Ocean. *Journal of Climate*, 13: 297-311.
- González, J.I., J. Ochoa & P. Ripa.** 1997. Variación estacional del nivel del mar en el Golfo de México y Mar Caribe. *GEOS. Unión Geofísica Mexicana*, 17 (33): 168-171.
- Gray, W.M. & J.D. Sheaffer.** 1991. El Niño and QBO influences on Tropical Cyclone Activity. From: Glantz et al. (eds): *Teleconnections linking worldwide climate anomalies*. Cambridge University Press, 257-284.
- Hastenrath, S.** 1991. *Climate dynamics of the tropics*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands. 488 p.
- Hurrell, J.W.,** 1995: Decadal trends in the North Atlantic Oscillation and relationships to regional temperature and precipitation. *Science* 269, 676-679.
- Jones, P.D., Jonsson, T. & Wheeler, D.** 1997. Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland. *Int. J. Climatol.* 17, 1433-1450.
- Kalnay E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebsuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetma, R. Reynolds, R. Jenne & D. Joseph.** 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437-470.
- Landsea, C.W., R.A. Pielke Jr., A.M. Mestas-Núñez & J.A. Knaff.** 1999. Atlantic basin hurricanes: indices of climatic changes. *Climatic Change*, 42: 89-129.
- Liebmann, B., G. Kiladis, G., C. Vera, A. C. Saulo & L. M. V. Carvalho.** 2004. Subseasonal Variations of Rainfall in South America in the Vicinity of the Low-Level Jet East of the Andes and Comparison to Those in the South Atlantic Convergence Zone. *J. Climate*, 17 (19): 3829–3842.
- Magaña, V., J.L. Pérez, J.L. Vázquez, E. Carrisoza & J. Pérez.** 1999a. El Niño y el clima. En: Magaña V. (ed). *Los impactos de El Niño en México*. UNAM. pp 23-66.
- Magaña, V., J.A. Amador & S. Medina.** 1999b. The Midsummer drought over México and Central America. *Journal of Climate*, 12(6): 1577-1578.
- Montoya, G.J., J. Pelkowski & J.A. Eslava.** 2001. Sobre los alisios del noreste y la existencia de una corriente en el piedemonte oriental Andino. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 25(96): 363-370.
- Mesa S, O., G. Poveda J & L.F. Carvajal S.** 1997. *Introducción al Clima de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Medellín. 390 p.
- Nobre, P. & J. Shukla.** 1996. Variations of sea surface temperature, wind stress and rainfall over the Tropical Atlantic and South America. *Journal of Climate*, 9: 2464-2479.
- Nystuen, J.A. & C.A. Andrade.** 1993. Tracking mesoscale ocean features in the Caribbean Sea using geosat altimetry. *Journal of Geophysical Research*, 98(C5): 8389-8394.
- Pabón, J.D.** 2003. El aumento del nivel del mar en las costas y área insular de Colombia. En: Montañez G., G., N.H. Campos, F. Avella y J. Polanía (eds). *El Mundo Marino de Colombia: Investigación y Desarrollo de Territorios Olvidados*. Universidad Nacional de Colombia, REMAR. pp 75-82.
- Poveda, G.** 1998. Retroalimentación dinámica entre el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur y la hidrología de Colombia. Tesis como requisito para el título de Doctor en Ingeniería en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia.
- _____. & **O.J. Mesa.** 1997. Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large scale ocean – atmospheric phenomena. *Journal of Climate*, 10(10): 2690-2702.
- _____. & _____. 1999. La corriente de chorro superficial del Oeste (“DEL CHOCÓ”) y otras dos corrientes de chorro en Colombia: Climatología y variabilidad durante las

- fases del ENSO. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 23(89): 517-528.
- Poveda, G. & O.J. Mesa.** 2000. On the existence of Lloró (the rainiest locality on earth): enhanced ocean land atmosphere interaction by a low level jet. *Geophysical Research Letters*, 27(11): 1675-1678.
- Pujos, M. & J.Y. Le Tareau.** 1988. Hydrogeologie de la plateforme continentale Caraibe colombienne au large du delta du Dique en saison des pluies: Consequence sur la circulation (Hydrogeology of the Colombian Caribbean continental platform around the Dique Delta in the rainy season: Consequences on circulation. *Bulletin de l'Institut de Geologie du Bassin d'Aquitaine*, 44: 97-107.
- Reynolds, R.W. & T.M. Smith.** 1994. Improved global sea surface temperature analysis. *Journal of Climate*, 1:75-86.
- Stensrud, D. J.** 1996. Importance of low level jets to climate: A review. *Journal of Climate*, 9: 1698-1711.
- Vernette, G.** 1985. La plata-forme continentale Caraibe du Colombie (du débouché du Magdalena au golfe de Morrosquillo). Importance du diapirisme argileux sur la morphologie et la sedimentation. Thèse de doctorat d'état ès Sciences presentee a l'Université de Bordeaux I. 381 p.
- Waylen, P.R. & M.E. Quesada.** 2001. Anomalías en las Temperaturas Superficiales en los Océanos Pacífico y Atlántico y su Relación con las Lluvias de Julio y Agosto en Costa Rica. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 8: 55-64.
- Wolter, K., & M.S. Timlin.** 1993: Monitoring ENSO in COADS with a seasonally adjusted principal component index. *Proc. of the 17th Climate Diagnostics Workshop*, Norman, OK, NOAA/NMC/CAC, NSSL, Oklahoma Clim. Survey, CIMMS and the School of Meteor., Univ. of Oklahoma, 52-57.
- _____. 1998: Measuring the strength of ENSO - how does 1997/98 rank? *Weather*, 53, 315-324.

Recibido el 15 de febrero de 2005.

Aceptado para su publicación el 10 de abril de 2006.

MÉTODO HÍBRIDO DE FRONTERAS NO REFLECTIVAS EN LÍMITES DE MODELOS SÍSMICOS

por

Alfredo Ghisays Ruiz*, Carlos Alberto Vargas J*. & Luis Alfredo Montes Vides*

Resumen

Ghisays Ruiz, A. C.A. Vargas & L.A. Montes: Método híbrido de fronteras no reflectivas en límites de modelos sísmicos. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **30** (115): 209-214. 2006. ISSN 0370-3908.

Para modelar la propagación de ondas en un medio se usan fronteras artificiales intentando eliminar las reflexiones en los límites del dominio computacional finito. Distintas aproximaciones han logrado atenuar parcialmente estas señales no deseadas. La implantación de fronteras perfectamente acopladas (PML) elimina estas reflexiones en un medio continuo. El uso de métodos finitos o elementos finitos requiere un modelo discreto espacialmente; esto da lugar a remanentes de tales reflexiones. Una disminución en el tamaño de la grilla redonda en la atenuación de las reflexiones pero incrementa el consumo de recursos computacionales. En este trabajo se muestran los resultados cuando se introduce una función de atenuación a la solución por PML en la zona de absorción, logrando una atenuación satisfactoria sin incrementar apreciablemente el uso de recursos de mecánicas. Las simulaciones se hicieron usando diferencias finitas, tanto en modelos simples de capas planas con buzamiento, como en modelos con una mayor complejidad estructural.

Palabras clave: Fronteras no reflectoras, Elementos Finitos, Diferencias finitas, Capas Perfectamente Acopladas, Modelamiento.

Abstract

To simulate wave propagation in a medium, artificial borders are introduced trying to eliminate reflections originated in limits of finite computational domain. Different approaches have attenuated partially these unwanted signals. The perfectly matched layers (PML) implementation eliminates these reflections in a continuous medium. The finite differences and finite elements methods require a discretized medium giving place to residual reflections. Diminishing the grid size improves

* Universidad Nacional de Colombia-Bogotá. Departamento de Geociencias. Grupo de Geofísica. Edificio Manuel Ancizar, Oficina 326. Ciudad Universitaria. Apartado 14490. Bogotá. PBX 3165000 Ext. 16539 correos electrónicos: lamontesv@unal.edu.co; cavargasj@unal.edu.co; AGhisays@helvetia.edu.co

attenuation but increases the computational resources demand. This paper shows results furnished by including an attenuation function to PML solution in the damped zone, obtaining a noticeable attenuation without increasing appreciably the use of machine resources. Simulations were done using finite differences using plane dipping layers models and complex geological structure models.

Key words: Non reflective borders, Finite elements, Finite differences, Perfectly matched layers, Modeling

Introducción

Al simular numéricamente la propagación de ondas en un medio se hace necesario limitar el tamaño del modelo para optimizar los recursos de computación. Esta imposición de fronteras artificiales introduce reflexiones espurias que contaminan los sismogramas, dificultan la comprensión de los fenómenos por estudiar. La solución más sencilla es utilizar un modelo mucho mayor al área estudiada para que las reflexiones de los bordes no alcancen la zona de interés en el tiempo de simulación, desperdiciando de este modo recursos de computación. Desarrollar por tanto una condición de frontera absorbente efectiva y estable de bajo costo computacional es una tarea importante en modelado numérico. El método implementado más común en los programas de simulación de ondas es la aproximación paraxial de la ecuación de onda de **Clayton & Engquist** (1977), que atenúa completamente las reflexiones por ondas que inciden normalmente en la frontera, disminuyendo su efectividad al aumentar el ángulo de incidencia. Otro enfoque es adicionar un filtro espacial mediante una zona de atenuación alrededor del modelo (**Cerjan et al.**, 1985; **Sarma et al.**, 1998); sin embargo, los resultados suministrados por estos métodos no han sido satisfactorios. El método PML (Perfectly Matched Layers) basado en zona de atenuación con capas perfectamente acopladas demostró ser altamente efectivo para absorber ondas electromagnéticas en medios bidimensionales (**Berenger**, 1994) y tridimensionales (**Berenger**, 1996). Su similitud con el sistema de ecuaciones de ondas elásticas lo llevó al modelado elastodinámico (**Chew & Liu**, 1996); desde entonces ha mostrando su efectividad como condición a fronteras no reflectoras siendo ampliamente utilizado en diferencias finitas y elementos finitos (**Chew & Weedon**, 1994; **Liu** 1997) e implantado en diversas aplicaciones (**Zeng & Liu.**, 2001; **Basu & Chopra**, 2003). El método requiere de un número finito de celdas en la zona de atenuación que incrementa su efectividad en la medida en que disminuye el tamaño de la celda a costa de mayor consumo de recursos computacionales (**Festa & Nielsen**, 2003). En desarrollo de un proyecto de modelado de propagación de ondas en áreas de piedemonte

colombiano se observó la presencia de estas reflexiones fantasmas en los registro sintéticos (**Montes et al.**, 2003; **Malaver & Montes**, 2005). Se realizó un estudio para establecer una técnica de eliminación de tales reflexiones y se estudiaron varias técnicas llegando finalmente a la inclusión de una función de atenuación en la solución PML en la zona de absorción. Se obtuvieron sismogramas sin reflexiones apreciables en los bordes de los modelos sísmicos, que indican que este enfoque mixto de condiciones de atenuación es apropiado. Se realizaron diferentes ensayos utilizando para la zona de atenuación tamaños de celda que satisfacían las condiciones de Courant. Las simulaciones que utilizan programas desarrollados en diferencias finitas, desde modelos simples de capas planas hasta modelos con una complejidad estructural considerable, suministraron registros libres de reflexiones espurias. La adición de la función de atenuación en las simulaciones PML no registró incrementos apreciables de recursos de computación.

Método de Capas Perfectamente Acopladas

El fundamento del método PML es introducir una capa absorbente de grosor finito alrededor del modelo, que minimice las reflexiones espurias. Dado su aplicabilidad en distintos campos, se presenta una generalización del método para su mejor comprensión. Se denomina dominio computacional el área correspondiente al modelo y PML a la zona amortiguada. Sea v un campo vectorial con condición inicial v_0 que se propaga en dirección x sujeto a la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{\partial v}{\partial t} - A \frac{\partial v}{\partial y} - B \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad [1]$$

El principio básico es acoplar la ecuación 1 en el dominio computacional con otra en la zona de atenuación tal que no halle reflexiones en la interfase que separa los dominios, con un decaimiento de la onda en la zona PML. Si el campo vectorial $v=v^{\parallel}+v^{\perp}$ se separa en sus componentes perpendicular (v^{\perp}) y paralela (v^{\parallel}) a la interfase, la ecuación 1 se descompone en el sistema de ecuaciones acopladas:

$$\begin{aligned}\frac{\partial v^\perp}{\partial t} - A \frac{\partial v}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial v^\parallel}{\partial t} - B \frac{\partial v}{\partial y} &= 0\end{aligned}\quad [2]$$

Sea una función $d(x)$ nula en el dominio computacional y positiva en la zona PML, la cual lleva a cabo la atenuación en la zona PML. Similar a v se define ahora una nueva función $\hat{u} = u^\perp + u^\parallel$ con condición inicial que es solución del sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u^\perp}{\partial t} + d(x)u^\perp - A \frac{\partial u}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial u^\parallel}{\partial t} - B \frac{\partial u}{\partial y} &= 0\end{aligned}\quad [3]$$

La solución armónica del sistema 1 con frecuencia angular satisface la ecuación:

$$i\omega\hat{v} - A \frac{\partial \hat{v}}{\partial x} - B \frac{\partial \hat{v}}{\partial y} = 0 \quad [4]$$

De igual forma para el sistema acoplado de ecuaciones [3] se tiene y

$$\begin{aligned}[i\omega + d(x)]\hat{u}^\perp - A \frac{\partial \hat{u}}{\partial x} &= 0 \\ i\omega\hat{u}^\parallel - B \frac{\partial \hat{u}}{\partial y} &= 0\end{aligned}\quad [5]$$

EL sistema de ecuaciones [5] es equivalente a

$$\begin{aligned}i\omega\hat{u}^\perp - \frac{i\omega}{i\omega + d(x)} A \frac{\partial \hat{u}}{\partial x} &= 0 \\ i\omega\hat{u}^\parallel - B \frac{\partial \hat{u}}{\partial y} &= 0\end{aligned}\quad [6]$$

De la expresión [6] y de su comparación con el sistema [1] se deduce que la introducción de capas PML consiste en realizar la sustitución

$$\frac{\partial}{\partial x} \Rightarrow \frac{\partial}{\partial \tilde{x}} = \frac{i\omega}{i\omega + d(x)} \frac{\partial}{\partial x} \quad [7]$$

La expresión [6] representa un cambio a variable compleja por

$$\tilde{x} = x - \frac{i}{\omega} \int_0^x d(s) ds$$

Se busca una solución al sistema de ecuaciones [3] mediante ondas planas $u = u^\parallel + u^\perp$

$$\begin{aligned}u^\parallel &= a^\parallel \exp[-i(k_x \tilde{x}(x) + k_y y - \omega t)], \\ u^\perp &= a^\perp \exp[-i(k_x \tilde{x}(x) + k_y y - \omega t)]\end{aligned}$$

La onda plana

$$u = v_o \exp[-i(k_x x + k_y y - \omega t)] \exp[-\frac{k_x}{\omega} \int_0^x d(s) ds]$$

con inicial v_o será solución del sistema [3] y representa la solución en el dominio computacional sin reflexión en la interfase con un factor de amortiguamiento

$\alpha_d = \exp[-\frac{k_x}{\omega} \int_0^x d(s) ds]$ en la zona PML en dirección x . Un estudio más detallado sobre la aplicación del método PML en distintos fenómenos elastodinámicos se puede consultar en **Chew & Liu** (1996).

Función de atenuación

Es un método extremadamente simple y capaz de amortiguar la amplitud de una onda en una zona de atenuación alrededor del modelo donde se quiere simular un fenómeno sísmico. De acuerdo con **Cêrjan et al.**, (1985), en la simulación por diferencias finitas se aplica una función de peso a las secciones que representan el estado del fenómeno en el tiempo actual y en el previo, en todos los puntos que se encuentran dentro de la zona de amortiguamiento.

La función tiene la forma $\alpha_d(i) = \exp[-0.015(Z - i)^2]$ donde Z es el número de nodos en la zona amortiguada en dirección del eje cartesiano e i indica i-nodo dentro de la misma en esa dirección.

Metodología

Durante la realización del proyecto en zonas de piedemonte colombiano se implementaron algoritmos en elementos finitos (**Montes et al.**, 2003) y en diferencias finitas (**Malaver & Montes**, 2005) con condiciones de fronteras no reflectivas (**Clayton & Engquist**, 1977; **Cêrjan et al.**, 1985) así como zona de atenuación (**Sarma et al.**, 1998) con resultados desalentadores en la eliminación de las reflexiones espurias, particularmente cuando las trayectorias de las ondas incidentes se alejaba de la

perpendicular a la frontera. Una implementación posterior de fronteras absorbentes con capas perfectamente acopladas en diferencias finitas arrojó mejores resultados; sin embargo la presencia de reflexiones parásitas llevó a un método híbrido de PML con una función de atenuación. En este artículo se consideran dos algoritmos para simular la propagación de la onda acústica, el primero con capas perfectamente acopladas - PML y el segundo incluyendo en la zona amortiguada una función de atenuación, un método híbrido que denominaremos PMLF. Para observar su respuesta, los algoritmos fueron ensayados en diferentes modelos. De estas pruebas se presentan los sismogramas correspondientes al modelo más simple y al más complejo. Los modelos representan medios estratificados con capas homogéneas separadas por interfaces arbitrariamente incurvadas, incluyendo superficie libre y grandes contrastes de velocidad. Para la simulación se generan modelos divididos en celdas cuadradas cuyas dimensiones están relacionadas con las velocidades en cada capa, bajo la restricción de que satisfagan las condiciones de Courant.

Análisis y resultados

El primero es un modelo simple, que consta de tres capas con buzamiento diferentes (Figura 1), con velocidades de 1500 m/s para la primera, de 2000 m/s para la

intermedia y de 2500 m/s para la más profunda. La fuente, una ondícula de Ricker de 60 Hz, se ubicó en un punto en el centro del modelo a una profundidad de 50m, mientras que los receptores fueron colocados sobre la interfase superior con intervalo de grupo de 5m, con intervalo de muestreo de 0.0005s y tiempo de registro de 1s. En la Figura 2 se muestra el sismograma obtenido para el modelo simple con PML en la zona de atenuación. En él se observa una continuidad débil del reflector más profundo, con reflexiones parásitas de la onda directa al alcanzar las fronteras laterales a 2 s aproximadamente, así como la presencia de ruido por debajo del segundo reflector que opacan la calidad de la imagen. A su vez, la Figura 3, que contiene el sismograma generado para el mismo modelo simple pero con PMLF, muestra una indudable mejoría en la continuidad de estos reflectores, sin la presencia de las reflexiones, ni el ruido manifiesto en el sismograma anterior.

En la Figura 4 se observa el segundo modelo, considerado más complejo, compuesto por tres capas separadas por dos interfases sinusoidales con un campo de velocidad para la primera de 900m/s, la segunda de 1500m/s y la tercera con 2500m/s. Se generó el correspondiente sismograma con PML que se observa en la Figura 5. En él

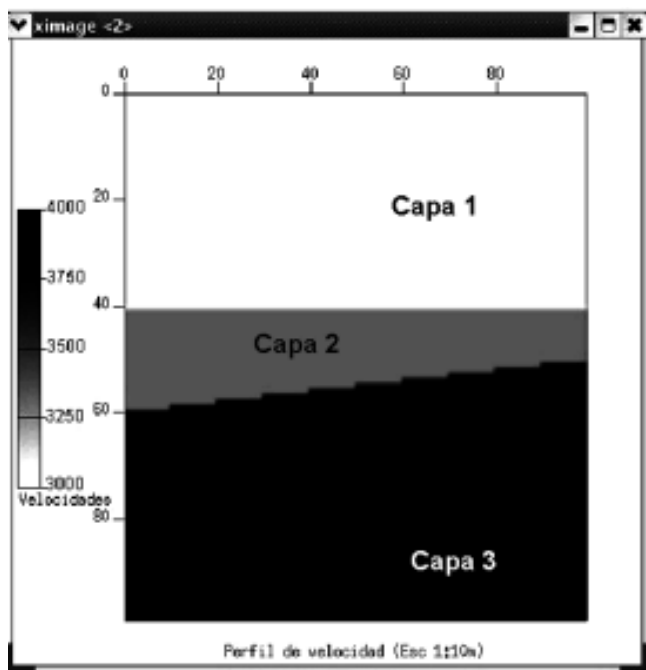


Figura 1. Modelo simple con capas con diferentes buzamientos.

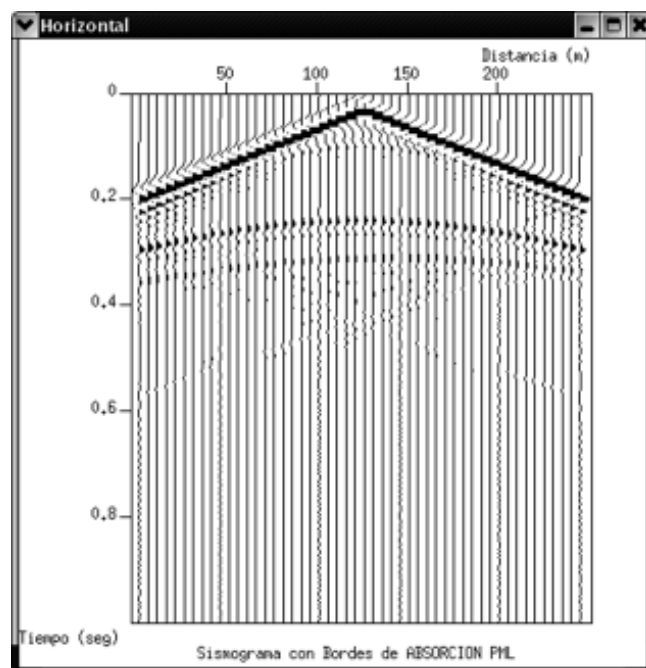


Figura 2. Sismograma obtenido de la simulación en el modelo de la figura 1, con fronteras PML, en la que se observan reflexiones que atraviesan la imagen.

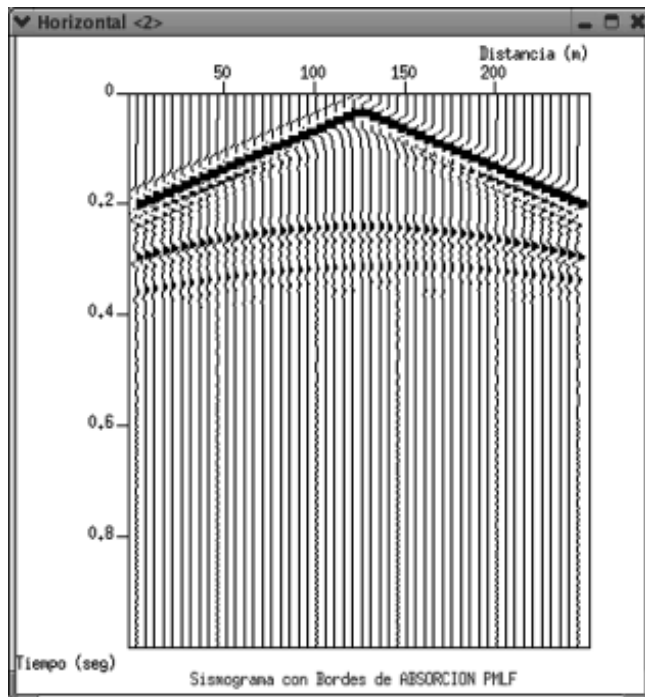


Figura 3. Sismograma logrado después de aplicar PMLF en fronteras. Las reflexiones de bordes en la figura 2 han desaparecido.

son evidentes las reflexiones de bordes, tanto de las ondas directas como de las provenientes de las interfases, donde la falta de continuidad de estos eventos dificulta la identificación de las distintas señales asociadas con los reflectores. La aplicación del PMLF sobre el modelo complejo mejora el contenido de la información, en el registro como se observa de la Figura 6. Las reflexiones visibles en la Figura 5 se han desvanecido por completo en el nuevo sismograma, donde ahora se aprecia mejor continuidad de los reflectores y facilita la identificación de las distintas señales provenientes de cada reflector. La diferencia en consumo de recursos de procesamiento para la obtención de las imágenes por ambos algoritmos es prácticamente indistinguible.

Conclusiones

Los resultados obtenidos indican que aunque el método PML permite obtener sismogramas sintéticos con una apreciable atenuación de las reflexiones de bordes, estos registros manifiestan la presencia de reflexiones parásitas que disminuyen la calidad de la información haciendo más difícil la interpretación de las imágenes producto de simulaciones de fenómenos ondulatorios. La técnica de uso aislado de una función de atenuación en una zona de

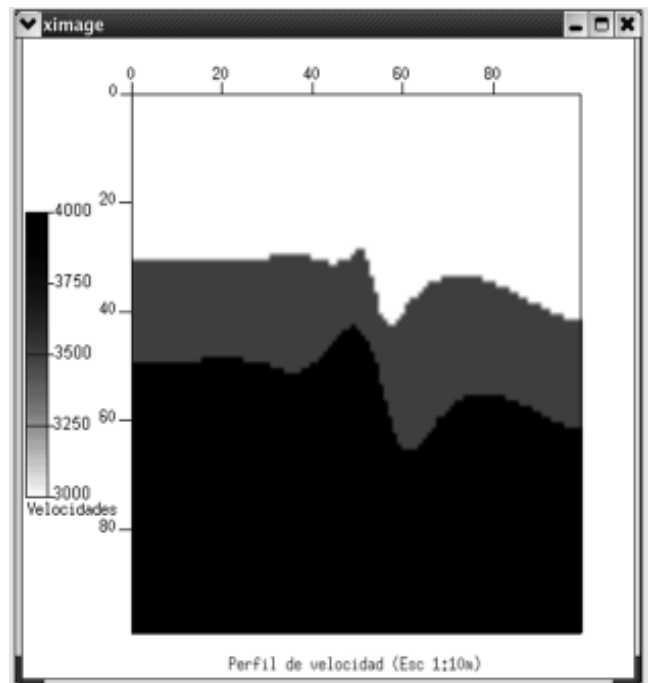


Figura 4. Segundo modelo mostrando una complejidad mayor al primero.

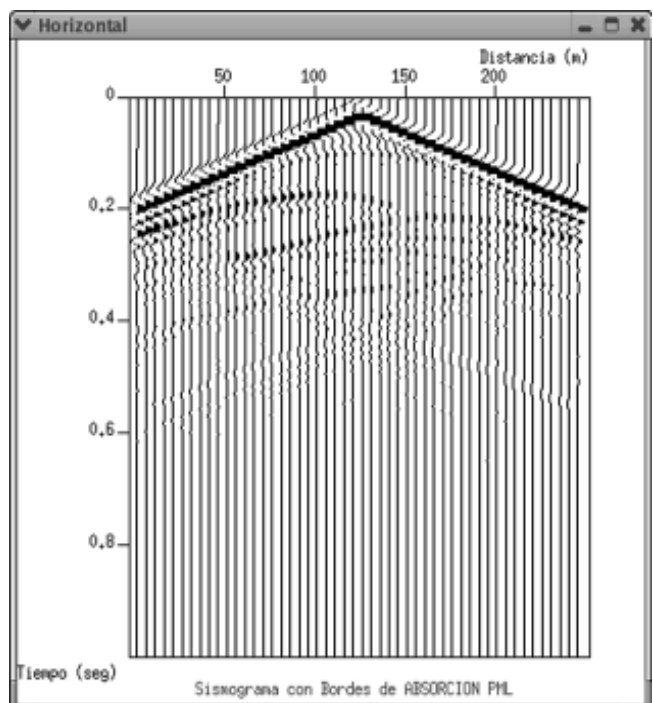


Figura 5. Sismograma sintético obtenido de la simulación en modelo en figura 4, con fronteras con PML. Nuevamente se observan reflexiones de bordes que atraviesan la imagen.

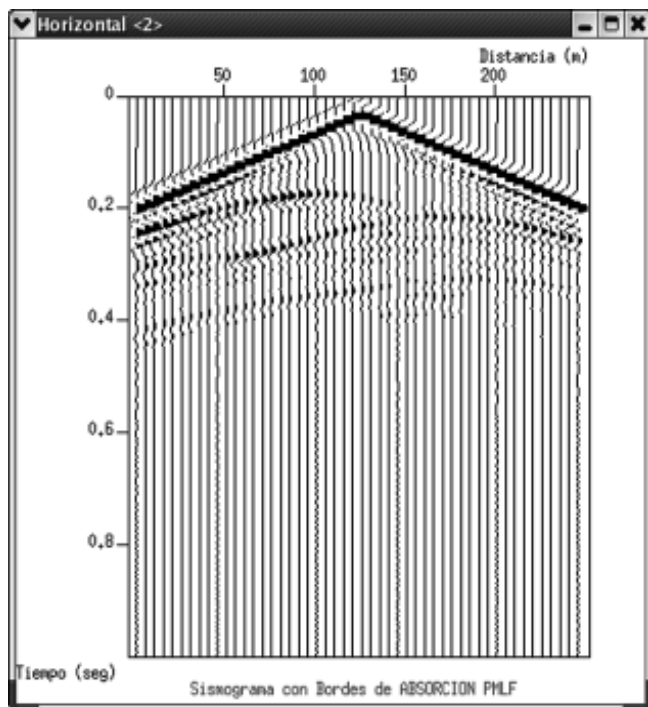


Figura 6. Como resultado de aplicar PMLF en los bordes del modelo de la figura 4, se han atenuado por completo las reflexiones de bordes.

absorción, como se sabe, tampoco suministra resultados alentadores. Sin embargo la aplicación conjunta de estos dos enfoques permite obtener sismogramas con una evidente atenuación de reflexiones no deseadas en simulación, con un costo computacional similar al de los métodos usados por separado. El método PMLF mostró ser efectivo y capaz de lograr eliminar las reflexiones en los límites de modelos sísmicos, permitiendo “aclarar” los reflectores más profundos. La aplicación de la técnica a datos sintéticos muestra que las reflexiones producidas por los bordes del modelo desaparecen, realizando la información de interés.

Bibliografía

- Basu U. & Chopra A.** 2003. Perfectly matched layers for elastic waves and applications to earthquakes analysis of dams. 16th ASCE Engineering Mechanics conference. University of Washington, Seattle.
- Berenger, J. P.** 1994. A Perfectly Matched Layers for the absorption of Electromagnetic waves. *J. Comput. Phys.* **114**: 185-200
- 1996. Three-dimensional perfectly matched layers for the absorption of electromagnetic waves. *J. Comp. Phys.* **127**: 363-379.
- Cърjan, C., Kosloff, D., Kosloff, R., & Reshef, M.** 1985. A Nonreflecting Boundary Condition for Discrete Acoustic and Elastic Wave Equations. *Geophysics.* **50**: 705-708.
- Chew W. & Liu Q.** 1996. Perfectly matched layers for elastodynamics: a new absorbing boundary condition, *J. Comp. Acoust.* **4**: 341-359.
- & **Weedon W.H.** 1994. A 3D perfectly matched medium from modified Maxwell's equations with stretched coordinates. *Microw. Opt. Technol. Lett.* **7**: 599-604.
- Clayton R. & Engquist B.** 1977. Absorbing boundary conditions for acoustic and elastic wave equation. *Bull. Seism. Soc. Am.* **67**: 1592-1450.
- Festa G. & Nielsen S.** 2003. PML absorbing boundaries. *Bull. Seism. Soc. Am.* **93**: 891-903.
- Liu Q. H.** 1997. An FDTD algorithm with perfectly matched layers for conductive media: *Opt. Technol. Lett.* **14**: 134-137.
- Malaver L. & Montes L.** 2005. Elastic approach to remove surficial waves from shot gathers, *Earth. Sci. Res. J.* **9** (1): 12-22.
- Montes L., Quintana R., Céspedes R., Espíndola N., Salinas T. & Pérez G.** 2003. Attenuation of the seismic dispersion associated to foothills topography, *CT&F*, **2** (4): 7-12.
- Sarma G., Mallik K. & Gadhinglajkar V.** 1998. Non reflective boundary condition in finite-element formulation for an elastic wave equation. *Geophysics*, **63** (3): 1006-1016.
- Zeng Y. J. & Liu Q.** 2001. The application of the perfectly matched layer in numerical modeling of wave propagation in poroelastic media. *Geophysics* **66**: 1258-1266.

Recibido el 5 de febrero de 2006.

Aceptado para su publicación el 10 de abril de 2006.

REPELENCIA AL AGUA EN SUELOS: UNA SÍNTESIS

por

Daniel Francisco Jaramillo Jaramillo¹

Resumen

Jaramillo Jaramillo, D.F.: Repelencia al agua en suelos: una síntesis. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **30** (115) 215-232. 2006. ISSN 0370-3908.

La repelencia al agua en el suelo, originada por la acumulación de compuestos orgánicos hidrofóbicos en él, reduce la infiltración y la disponibilidad de agua para las plantas; incrementa la escorrentía y la susceptibilidad a la erosión; puede deteriorar su estructura; genera grandes pérdidas en la producción agropecuaria y forestal y puede generar vías de flujo preferencial que facilitan el movimiento de agua y de contaminantes a través del mismo. Tiene una alta variabilidad y se expresa con mayor intensidad cuando el suelo está seco. Para manejar este problema se han estudiado alternativas como la mecanización del suelo durante o inmediatamente después de la lluvia, la mezcla del suelo repelente con arcilla y/o con materiales terrosos arcillosos del subsuelo, el encalamiento, la fertilización, la aplicación de riego para mantener húmedo el suelo y la adición de surfactantes.

Palabras clave: Hidrofobicidad de suelos, Suelos repelentes al agua, Suelos hidrofóbicos.

Abstract

Water-repellency of soil is generated by accumulation of hydrophobic organic compounds in the soil. This condition can destroy soil structure, reduce water infiltration and soil water availability for plants, increase runoff and soil erodability, and consequently generate high losses in crop, pasture and forest productivity. Similarly, water repellency of soil can create preferential flow pathways that favor movement of water and pollutants through soil profile. It has been observed that water-repellency exhibits a high variability and it is expressed more strongly when the soil has been dried. Many strategies have been tested for the management of water repellent soils that include: soil tillage during or immediately after a rain event, mixing water repellent soil with either clay and with clayey subsoil ("claying"), lime application, fertilization, irrigation to maintain soil moisture, and addition of wetting agents.

Key words: Soil hydrophobicity, Water-repellent soils, Hydrophobic soils.

¹ Profesor Titular. Escuela de Geociencias. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. A. A. 3840. Correo electrónico: djaramal@unalmed.edu.co

Introducción

Con este trabajo se pretende ilustrar a los lectores acerca del fenómeno de la repelencia al agua en los suelos, con el objetivo fundamental de motivarlos para que orienten algunos de sus esfuerzos académicos e investigativos al estudio de dicho problema.

La repelencia al agua: marco teórico

Un material sólido (incluyendo el suelo) se considera hidrofóbico o repelente al agua cuando entre la superficie del agua (interfase agua-aire) y la superficie del sólido (interfase agua-sólido) se forma un **ángulo de contacto** mayor o igual a 90° (Figura 1).

En el caso de los suelos, la mayoría de las veces la repelencia al agua no se manifiesta en forma permanente sino que se hace de forma estacional, siendo más intensa en las épocas secas, razón por la cual es frecuente hablar de “**suelos de difícil humectabilidad**” o de “**suelos resistentes a la humectación**” para referirse a los “suelos repelentes al agua”.

Desde un punto de vista práctico y sin que haya algún significado físico especial en ello, un suelo se considera repelente al agua si una gota de agua colocada sobre su superficie tarda más de 5 segundos en ser absorbida completamente (Richardson, citado por **Dekker & Jungerius**, 1990).

La **severidad** de la repelencia al agua es el grado de resistencia que opone el suelo al humedecimiento por el agua, durante un tiempo limitado de contacto entre las fases sólida y líquida (**Roy & McGill**, 2002). **Doerr et al.**

(2000) la definen con la pregunta “¿qué tan fuertemente es repelida el agua por el suelo?”.

Watson & Letey (1970) observaron, al colocar una gota de agua sobre la superficie de un suelo repelente a ella, que la misma permanecía sobre dicha superficie un tiempo, cuya duración dependía de la tensión superficial inicial del líquido y, con base en esta observación, consideraron que ese tiempo era una medida, no de la repelencia al líquido en sí, sino del tiempo que era necesario para que el ángulo de contacto inicial ($> 90^\circ$) se redujera hasta un valor de 90° o menos y así el líquido pudiera ser absorbido por el sólido; ese tiempo lo definieron como la **persistencia** de la repelencia al agua del suelo, es decir, que era una medida de la “estabilidad de la repelencia”.

Origen de la repelencia al agua en los suelos

La repelencia al agua en el suelo se debe a la acumulación de ciertos tipos de compuestos orgánicos hidrofóbicos en él, los cuales no presentan un grado de alteración muy avanzado, es decir, no corresponden con humus propiamente dicho. Estos compuestos pueden producirse por el metabolismo y/o la descomposición de organismos, principalmente vegetales y microbiales (**Doerr et al.**, 2000), por someter el suelo a incendios, quemas y calentamiento o secado (**DeBano**, 1981, 2000; **Dekker & Ritsema**, 2000) o por contaminar el suelo con petróleo y/o con sus derivados (**Roy & McGill**, 1998).

Doerr et al. (2000) reúnen los compuestos responsables de la repelencia al agua en el suelo en dos grandes grupos:

- El primero, compuesto por **hidrocarburos alifáticos** que son sustancias formadas por hidrógeno y carbono, con los carbonos distribuidos en cadenas largas. Estos compuestos son no polares y, en consecuencia, son casi insolubles en agua.
- El segundo grupo está formado por compuestos de estructura **anfifílica**, es decir que son compuestos que tienen una parte terminal polar y otra no polar. La parte terminal polar es hidrofílica, en tanto que la no polar es hidrofóbica.

La vegetación

Las plantas hacen el mayor aporte de sustancias que pueden generar repelencia al agua en el suelo. Prácticamente todos sus órganos contienen compuestos hidrofóbicos que pasan al suelo, ya sea porque la descomposición los libera cuando la planta o alguno de sus órganos mueren, o porque son aportados mediante lavado de las superficies vegetales vivas o porque fluyan hacia el suelo en forma de exudados.

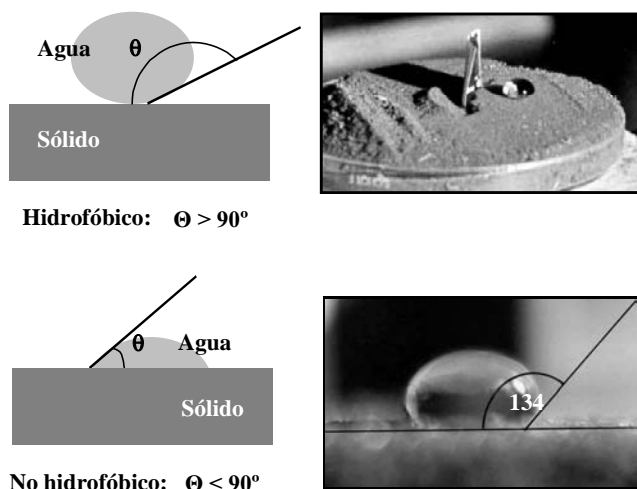


Figura 1. Ángulo de contacto entre un sólido repelente y no repelente al agua y en suelo repelente al agua.

De las revisiones hechas por **DeBano** (1981), **Wallis & Horne** (1992) y **Doerr et al.** (2000) se destacan los siguientes géneros y especies por ser mencionados con mayor frecuencia en la literatura (el orden en que se presentan no implica mayor o menor efecto sobre la repelencia al agua en el suelo):

- **Árboles:** *Acacia*, *Acer*, *Banksia*, *Carya*, *Citrus*, *Cupressus*, *Eucalyptus*, *Juniperus*, *Larix*, *Picea*, *Pinus*, *Populus*, *Pseudotsuga*, *Quercus*, *Tsuga*.
- **Rastrojos:** *Adenostema*, *Arctostaphylos*, *Calluna*, *Cercidium*, *Chamaespartium*, *Chrysotamnus*, *Chusquea*, *Cistus*, *Erica*, *Larrea*, *Prosopis*, *Pteridium*, *Vaccinium*, *Ulex*.
- **Cereales cultivados:** *Hordeum vulgare*, *Triticum aestivum*.
- **Leguminosas:** *Lupinus cosentinii*, *Medicago sativa*, *Trifolium subterraneum*.
- **Pastos:** *Agrostis*, *Erharta*, *Phalaris*, *Phragmites*, *Spinifex*.

Los microorganismos

Según información recopilada por **Jaramillo** (2004), los microorganismos que pueden producir repelencia al agua en el suelo son más de 60 especies de Basidiomicetes, siendo señalados con mayor frecuencia *Amanita muscaria*, *Amanita vaginata*, *Aspergillus sydowi*, *Cortinarius sp.*, *Fusarium sp.*, *Lactarius deliciosus*, *Marasmius oreades*, *Penicillium nigricans*, *Piloderma bicolor*, *Rhizopogon vinicolor*, *Russula sp.* y *Trichoderma sp.*

Incendios, quemas y secado del suelo

Otro agente que puede generar repelencia al agua en el suelo es el fuego. **DeBano** (1981, 2000) ha destacado los siguientes resultados:

- La intensidad del fuego, la cantidad de materia orgánica fresca (hojarasca) acumulada sobre la superficie del suelo y la acumulación de productos de la descomposición y del metabolismo de los organismos que viven en él, determinan el efecto que va a tener el fuego sobre la repelencia al agua del suelo.
- El calor producido por la combustión de la capa de hojarasca puede alcanzar entre 850 y 1100°C y vaporizar sustancias orgánicas que son movidas hacia el interior del suelo siguiendo un gradiente de tempera-

tura, hasta que llegan a capas interiores más frías que hacen que se condensen en ellas, generándose la hidrofobicidad en ellas.

- Después de un incendio la repelencia al agua puede manifestarse como una capa discreta, de espesor y continuidad variables, en la superficie del suelo o a unos pocos centímetros de profundidad y paralela a su superficie.
- Con respecto a la relación entre la temperatura y la repelencia al agua en el suelo, se producen cambios muy pequeños cuando el calentamiento se hace a menos de 175°C; se produce una intensa repelencia cuando este se hace entre 175 y 200°C; con temperaturas entre 280 y 400°C ocurre la destrucción de casi todos los compuestos hidrofóbicos.

No sólo las temperaturas alcanzadas durante un incendio son capaces de alterar el comportamiento hídrico del suelo. **Jaramillo** (2003) mostró que el secado de las muestras de Andisoles incrementaba la repelencia al agua del suelo así como el espesor de éste afectado por ella, al incrementar la temperatura de secado desde la condición de campo (aproximadamente 15°C) hasta temperaturas de 35 y de 105°C. En la Figura 2 puede verse que el suelo estudiado no presentó repelencia al agua en condiciones de campo (WDPT c)² en ningún punto y en ninguna profundidad; sin embargo, cuando fue sometido a secado en laboratorio a 35°C (WDPT 35), se presentó algún grado de repelencia al agua en todos los sitios estudiados y cuando las muestras se secaron a 105°C (WDPT 105), todo el perfil del suelo estudiado en 4 profundidades (casi 30 cm), fue extremadamente repelente al agua. Efectos similares encontró **Vanegas** (2003) al secar Andisoles a temperaturas de 15, 20, 25, 30, 35 y 105°C.

Contaminación con petróleo

Roy et al. (2000) estudiaron 27 sitios que habían tenido derrames de petróleo crudo durante 20 a 50 años, en Alberta, Canadá y encontraron que en cada uno de los sitios se presentaron entre 1 y 8 parches hidrofóbicos que variaron de tamaño entre 0.03 y 6.4 ha, con un tamaño promedio de 0.38 ha. El grado de repelencia al agua fue evaluado mediante el MED³ en muestras superficiales tamizadas a 1 mm, encontrando 20 muestras severamente repelentes al agua (MED > 2.2. M) y 7 con MED = 2.2 M. En dos sitios se presentó un MED > 5 M.

2 **WDPT:** Abreviatura de **Water Drop Penetration Time**, es decir, tiempo de penetración de una gota de agua en el suelo; es la manera de evaluar la persistencia de la repelencia al agua en el suelo. Ver página 227.

3 **MED:** Abreviatura de **Molarity Ethanol Drop**, es decir, molaridad de la gota de una solución de etanol que entra al suelo en 5 segundos o menos. Ver página 227.

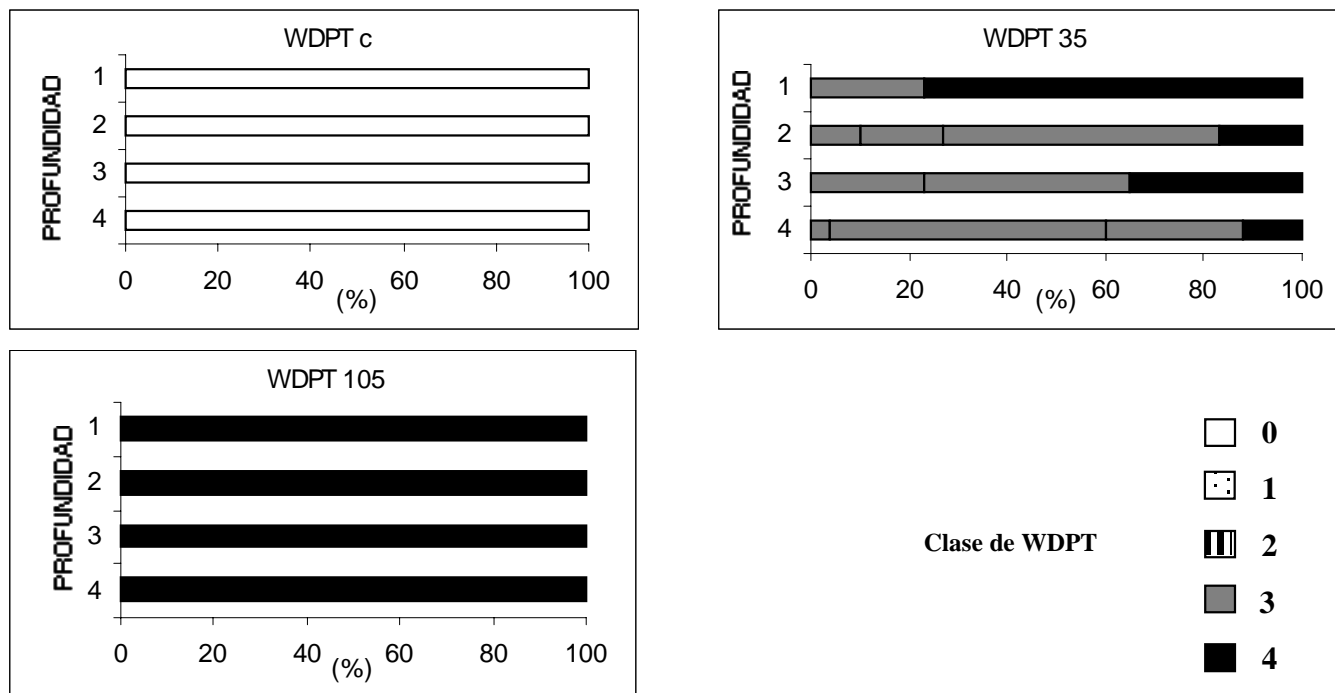


Figura 2. Efecto del secado sobre la repelencia al agua de Andisoles de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas (Medellín, Colombia) bajo cobertura de *Pinus patula*. Para las clases de WDPT ver Tabla 5. (Con base en datos de Jaramillo, 2003).

A pesar de que los compuestos hidrofóbicos que causan la repelencia al agua son de naturaleza orgánica, en muy pocos trabajos se ha podido relacionar el grado de repelencia al agua del suelo con su contenido de materia orgánica y, en la mayoría de ellos, las relaciones significativas establecidas han presentado coeficientes de determinación bajos y poco satisfactorios para hacer predicciones acerca de la eventual manifestación del fenómeno en un suelo dado, con un determinado contenido de materia orgánica. Este comportamiento ha llevado a concluir que “no es la cantidad sino el tipo de materia orgánica del suelo, lo que hace que se manifieste la repelencia al agua en él”.

Luego de que se producen los compuestos hidrofóbicos, éstos se distribuyen en el suelo para imprimirle ese carácter de repelencia. En la distribución, los compuestos van recubriendo total o parcialmente granos, agregados y/o paredes de los poros, transmitiéndole al material afectado su comportamiento hidrofóbico.

Ocurrencia de la repelencia al agua en el suelo

La repelencia al agua es un fenómeno documentado ampliamente en gran cantidad de países. DeBano (1981) cita trabajos en los que se ha estudiado sistemáticamente en Estados Unidos, Australia, Canadá, Egipto, Holanda,

India, Japón, Rusia y Nueva Zelanda. Otros investigadores, citados por Jaramillo (2004), registran estudios hechos en Alemania, Brasil, Chile, China, Colombia, Ecuador, España, Grecia, Italia, Malí, Polonia, Portugal, Reino Unido, Suiza, Sudáfrica y Turquía.

Aunque es difícil establecer la distribución y la cobertura de la repelencia, en algunas regiones se ha observado que afecta áreas extensas ocasionando problemas graves en la producción agropecuaria. House, citado por Doerr *et al.* (2000), estima que en Australia se encuentran afectadas por el fenómeno de repelencia al agua 5 millones de hectáreas, en las cuales se genera hasta un 80% de pérdidas en la producción agrícola. Blake (2002) señaló que en suelos del oeste de Australia había caídas en la producción de cereales de 5 t ha⁻¹ a menos de 0.5 t ha⁻¹, por efecto de la repelencia.

Dekker & Ritsema (1994) encontraron que el 75% de los horizontes superficiales de los suelos de las tierras agrícolas y ganaderas de Holanda presentan algún grado de repelencia al agua y que más del 95% de los mismos horizontes, en suelos de reservas naturales, son de fuerte a extremadamente repelentes al agua.

Se reconoce que la repelencia al agua es un fenómeno de superficie específica y, sin duda, lo es en ambientes donde la acumulación de materia orgánica es baja, debi-

do a la alta rata de mineralización que se produce en los suelos. Posiblemente ésto explique la presencia de hidrofobicidad extrema reconocida en amplias zonas secas y con suelos arenosos de Australia.

Sin embargo se ha comprobado que la textura arenosa no es la única susceptible de asimilar la hidrofobicidad. Otra situación que puede restarle importancia al fenómeno de superficie específica es que las partículas o los agregados no tienen que estar recubiertos completamente con sustancias hidrofóbicas para que el suelo, en su conjunto, se manifieste como tal (Bisdorn *et al.*, 1993; Dekker, 1998; Doerr *et al.*, 2000).

Scott (2000) no encontró un efecto significativo de la textura sobre su grado de repelencia en un muestreo hecho en 10 localidades de Sudáfrica bajo plantaciones forestales de eucaliptos y pinos; las clases texturales variaron de arenoso franco a arcillo limoso. Roy *et al.* (2000) concluyeron que el desarrollo de repelencia al agua en los suelos no estuvo restringido a ninguna clase textural en particular, puesto que encontraron muestras hidrofóbicas en las 10 clases texturales de los 27 sitios analizados y no tuvieron muestras arcillosas ni limosas.

Aunque la repelencia ha sido ampliamente observada en condiciones de climas secos y suelos arenosos, éstas no son las únicas condiciones en las que se produce. Se ha registrado también en climas húmedos tropicales (Jaramillo, 1992; Pérez *et al.*, 1998; Jaramillo *et al.*, 2000), en clima húmedo mediterráneo (Doerr & Thomas, 2000) y en otros climas húmedos del norte de Europa (Doerr *et al.*, 2000). En la literatura hay registros de repelencia en una gran variedad de suelos, desde minerales hasta orgánicos, incipientes a muy evolucionados, fuertemente ácidos a alcalinos, fértiles a poco fértiles, lo que da pie para pensar que la *hidrofobicidad puede presentarse en cualquier tipo de suelo*.

La hidrofobicidad se ubica, en el caso más común, en su superficie. Cuando el suelo posee una capa de hojarasca, con mayor frecuencia se ubica en el contacto entre los dos materiales, afectando la parte mineral del mismo, aunque la hojarasca también puede presentarse hidrofóbica (Jaramillo, 2003, 2005) (ver Figura 3). Cuando el suelo ha sido sometido a quemas o a incendios fuertes, se puede generar una capa hidrofóbica subsuperficial. Una forma frecuente de repelencia al agua en el suelo es a manera de parches, áreas de suelo hidrofóbico que alternan con cuerpos de suelo humectable, como puede verse en la figura 4.

Un aspecto fundamental al estudiar la repelencia al agua es que muestra una alta variabilidad, tanto aleatoria, como temporal y espacial. El fenómeno no se manifiesta de manera permanente: se presenta con máxima intensi-



Figura 3. Ubicación de una capa de suelo repelente al agua (de color claro por estar seca) en un Andisol de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas (Medellín, Colombia), inmediatamente debajo de la capa de acículas de *Pinus patula* acumulada sobre su superficie (Tomada de Jaramillo, 1992).

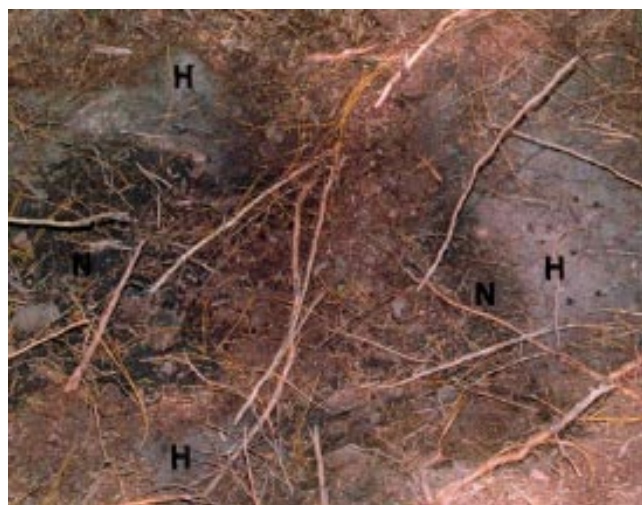


Figura 4. Parches de suelo repelente al agua (H) de color claro, alternando con suelo humectable normalmente (N) de color oscuro, en Andisoles de la quebrada Piedras Blancas (Medellín, Colombia), bajo cobertura de *Pinus patula* (Tomada de Jaramillo, 1992).

dad en las épocas más secas y disminuye, llegando inclusive a desaparecer, en las épocas húmedas. Períodos prolongados de sequía generan alta intensidad en la hidrofobicidad y una alta dificultad para humedecer nuevamente el suelo, pudiéndose necesitar períodos largos de humedecimiento para restablecer su humectabilidad. Este comportamiento ocasiona retraso en el diagnóstico de la repelencia, simplemente porque con mayor frecuencia los suelos se observaron estando húmedos y pocas veces después de una sequía prolongada.

Además de la alta variabilidad estacional que presenta la repelencia se ha establecido que también posee una alta variabilidad espacial, predominantemente de rango corto (Dekker, 1998; Ritsema, 1998, Jaramillo, 2003, 2004; Vanegas, 2003; Caballero, 2005).

Efectos de la repelencia al agua en el suelo

La presencia de materiales repelentes al agua imprime al suelo una serie de comportamientos particulares, sobre todo con su hidrología y con la susceptibilidad a la erosión.

Contenido de humedad

El hecho de que un suelo manifieste algún grado de repelencia al agua no quiere decir que deba estar completamente seco. En la Tabla 1 se aprecia que el contenido de humedad en muestras con algún grado de repelencia puede ser bastante alto, después de ser sometidas a secado a 35°C. No existe relación directa entre la repelencia al agua y el contenido de humedad de las muestras; las menos repelentes no son las que conservan mayor cantidad de humedad.

Doerr *et al.* (2000) registra varios trabajos en los que se obtuvieron altos valores de humedad almacenada en suelos repelentes al agua y recopila algunas propuestas en relación con los mecanismos que podrían explicar esa situación:

- El movimiento de agua en forma de vapor se produce libremente en el suelo y puede ayudar a redistribuir la humedad en el interior del mismo, acumulando humedad en los suelos hidrofóbicos.
- La presencia de materiales finos hidrofílicos embebidos en el espacio poroso de una matriz de suelo hidrofóbica puede permitir el humedecimiento parcial del suelo, a la vez que dichos materiales pueden actuar como núcleos de condensación de vapor de agua.
- Algunas partículas hidrofóbicas pueden sufrir transformaciones durante el proceso de adsorción de vapor, permitiendo la entrada de agua al suelo.

Dekker & Ritsema (1994, 1995) observaron en varios tipos de suelos de Holanda que, a pesar de presentar repelencia conservaban contenidos importantes de humedad, teniendo en cuenta las texturas y sus contenidos de materia orgánica. Los contenidos de humedad tenían una alta variabilidad espacial, tanto superficial como en profundidad, así como una apreciable variabilidad estacional. Pese a la alta variabilidad, observaron que había un “*contenido crítico de humedad*” para que se presentara repelencia al agua, el cual definieron como el “contenido de humedad que presenta el suelo, por debajo del cual se manifiesta repelente al agua y por encima del cual es humectable”. La humedad crítica es más variable, estacionalmente, en los primeros centímetros del suelo, probablemente debido a mayor contenido de materia orgánica.

Dekker & Ritsema (2000) en suelos de Holanda encontraron valores críticos de humedad volumétrica desde 2%, entre 35 y 40 cm de profundidad en un Psammaquent, hasta de 25%, entre 10 y 15 cm de profundidad en un Fluvaquent franco limoso, con una alta variabilidad tanto horizontal como vertical.

Doerr & Thomas (2000), en suelos de Portugal (Umbric Leptosols superficiales y Humic Cambisols), con texturas

Tabla 1. Contenido de humedad gravimétrico (%) de muestras de Andisoles de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas (Medellín, Colombia), bajo cobertura de *Pinus patula*, con diferente grado de repelencia al agua, sin secar y secadas a 35°C.

| Clase de WDPT* | Muestras sin secar (n = 804) | | | Muestras secadas a 35°C (n = 811) | | |
|----------------|------------------------------|--------|--------|-----------------------------------|--------|--------|
| | Promedio | Máximo | Mínimo | Promedio | Máximo | Mínimo |
| 0 | 216.36 | 771.98 | 64.05 | 19.58 | 63.84 | 8.17 |
| 1 | 300.47 | 568.30 | 198.87 | 26.01 | 64.87 | 10.50 |
| 2 | 226.04 | 300.11 | 87.84 | 21.54 | 65.87 | 10.72 |
| 3 | - | - | - | 20.63 | 92.80 | 7.53 |
| 4 | - | - | - | 21.23 | 67.35 | 7.76 |
| General | 221.72 | 771.98 | 64.05 | 21.13 | 92.80 | 7.53 |

* Clases según Dekker & Jungerius (1990). Ver Tabla 5.

franco arenosas y arenoso francas, con menos de 6% de arcilla y en clima húmedo mediterráneo, encontraron un límite crítico de humedad gravimétrica de 28%, aunque señalaron que no existía relación clara entre el incremento de la hidrofobicidad y la disminución de la humedad.

Dekker et al. (2001) revisaron el concepto de “contenido crítico de humedad del suelo” propuesto por **Dekker & Ritsema** (1994) y concluyeron que no es adecuado plantear ese contenido de humedad con un valor único, como un límite tajante, por encima del cual el suelo es humectable y, por debajo, es repelente al agua, sino que es más conveniente y refleja mejor la relación humedad-repelenencia, si se define un rango de humedad crítico que cumpla esa función de clasificación de la humectabilidad; a este rango le dieron el nombre de “*zona de transición del contenido de humedad crítico del suelo*”. Las muestras pueden ser humectables o repelentes al agua, dentro de la zona de transición. Los límites de la zona de transición son determinados por el contenido mínimo de humedad que se obtiene en la clase 0 de WDPT y el contenido máximo de humedad que se obtiene en cualquier otra clase de WDPT, diferente a la clase 0 (ver Tabla 5).

Dekker et al. (2001) evaluaron el contenido de humedad crítico en suelos arenosos de dunas de Holanda, haciendo ocho muestreos en perfil, en diferentes épocas y en seis profundidades. Determinaron la persistencia de la *repelenencia real* (en el suelo con la humedad de campo) y la de la *repelenencia potencial* (en suelos secados en laboratorio a diferentes temperaturas) a 25°C y a 65°C con el método del WDPT. A cada una de las muestras, en las diferentes condiciones experimentales, se les determinó el contenido de humedad. Encontraron que, en los primeros 20 cm la zona de transición tuvo, como límite inferior de humedad volumétrica, contenidos entre 18% en la superficie y 2% a 19 cm de profundidad, mientras que el límite superior, para las mismas profundidades, fue de 23% y de 5% de humedad.

Jaramillo (2003) trató, infructuosamente, de definir el límite crítico de humedad para los Andisoles en la cuenca de la quebrada Piedras Blancas (Medellín, Colombia), con una base de 811 muestras bajo cobertura de *Pinus patula*. En trabajos posteriores, **Jaramillo** (2005), también en Andisoles con cobertura de *Pinus patula* y **Caballero** (2005), en Andisoles con cobertura de *Pinus patula*, *Cupressus lusitanica* y *Quercus humboldtii*, tampoco pudieron definir ni valores ni zonas de transición de contenidos de humedad críticos. En la Figura 5 se observa que no hay relación entre la humedad del suelo y su repelenencia al agua, en 128 muestras superficiales de Andisoles de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas (Medellín, Colombia), ni en condiciones de humedad de campo (repelenencia real), ni cuando fueron secadas a 35°C (repelenencia potencial).

La infiltración y el humedecimiento del suelo

En un suelo humectable y seco, el proceso de humedecimiento inicial es rápido debido a las altas fuerzas de atracción que se generan entre los sólidos del suelo y el agua; sin embargo, este proceso puede llegar a ser extremadamente lento en suelos que, estando secos, presentan materiales repelentes al agua.

En términos de infiltración, la rata de entrada del agua a un suelo humectable y seco, inicialmente es alta pero al poco tiempo empieza a decrecer; por el contrario, en un suelo repelente al agua, la rata de infiltración, al iniciar el proceso de humedecimiento, es supremamente lenta e inclusive puede ser nula; el agua empezará a penetrar en el suelo al cabo de un tiempo de contacto; al aumentar el tiempo, la rata de infiltración también aumenta.

Wilkinson & Miller (1978) evaluaron la rata de infiltración en parches con suelo repelente al agua y en suelo normal en un campo de golf y encontraron que en los parches hidrofóbicos dicha tasa fue sólo el 20% de la tasa observada en el suelo normal adyacente.

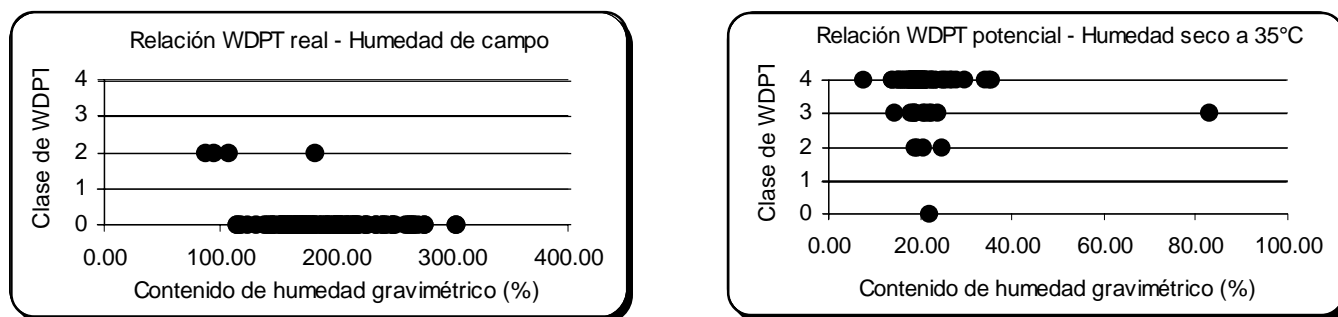


Figura 5. Relación de la repelenencia al agua, real y potencial a 35 °C, y de la humedad correspondiente, en Andisoles de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas (Medellín, Colombia) bajo cobertura de *Pinus patula*.

Moral et al. (2003) estudiaron problemas hidrológicos en varios suelos arenosos con repelencia al agua en el Parque Natural de Doñana, al sur de la península Ibérica. Hicieron ensayos de infiltración en campo y en laboratorio con ayuda de infiltrómetros de succión, con tiempo límite de duración para la prueba de 20 minutos, dada la textura gruesa que presentaban los suelos. Utilizaron agua y etanol para hacer las pruebas de infiltración. En la figura 6 se observan algunos de los resultados obtenidos. Puede verse que en el suelo humectable (Figura 6a), con agua y con etanol se obtienen prácticamente las mismas curvas de infiltración para el tiempo de observación utilizado; en cambio, cuando los suelos fueron repelentes al agua (Figura 6b), hubo una marcada diferencia entre las curvas conseguidas con etanol y con agua.

Nótese en la Figura 6b que con etanol las curvas presentan un comportamiento similar al del agua en el suelo no repelente; rápidamente empieza a mostrar la tendencia a volverse asintótica y a estabilizarse; en cambio, con agua, terminado el tiempo de la prueba, la curva de infiltración todavía está en su fase ascendente y muy lejos del tope que está poniendo la curva del etanol. Téngase en cuenta que el etanol no se ve afectado por la presencia de repelencia al agua en el suelo.

DeBano (1971) estudió el efecto de la repelencia sobre el avance del frente de humedecimiento en columnas de suelo de textura gruesa, colocadas horizontalmente;

encontró que dicho frente se movió 25 veces más rápido en la columna que contenía suelo humectable que en la que tenía el suelo repelente al agua. Además, observó que la diferencia en el contenido de humedad entre el punto de contacto del suelo con la fuente de agua y el frente de humedecimiento varió entre 20 y 25%, en el suelo repelente, mientras que en el humectable sólo varió alrededor del 10%, aparte de que el suelo repelente al agua presentó un frente de humedecimiento muy mal definido; el agua no mojó este suelo en forma homogénea.

Wallis et al. (1990a) también encontraron grandes diferencias entre la rata de infiltración mostrada por dos sitios con suelos arenosos con diferentes grados de repelencia: el sitio menos repelente tuvo una rata de infiltración, en una prueba de 10 minutos de duración, equivalente a 204 mm h^{-1} , mientras que en el más repelente dicha rata fue de sólo 36.6 mm h^{-1} , valores promedio de tres repeticiones por sitio.

Escorrentía y erosión

El hecho de retardar la velocidad de entrada del agua al suelo en un terreno cuya superficie tenga algún gradiente de pendiente, puede llevar a que la rata de aporte de agua sobrepase su rata de infiltración y a que se genere un excedente de humedad que empezará a fluir por encima de la superficie del suelo. Si no se tiene, gradiente de pendiente, se presentará un encharcamiento del terreno. Sin embargo,

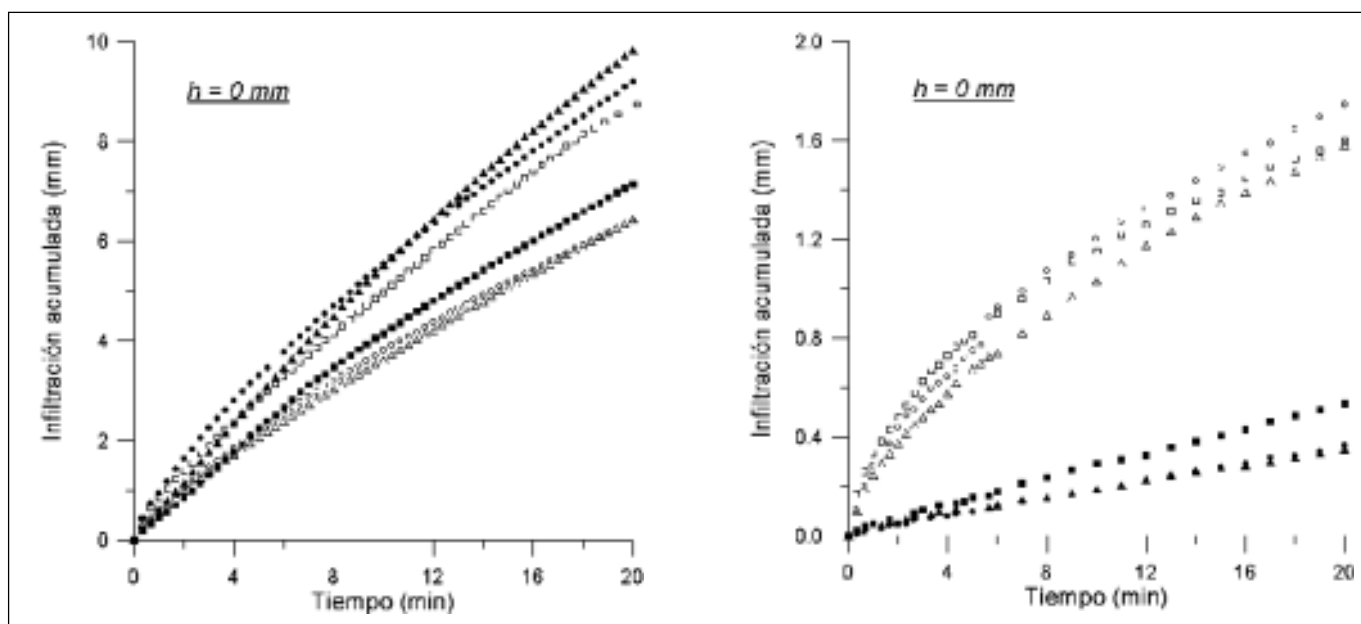


Figura 6. Curvas de infiltración obtenidas en laboratorio con diferentes muestras, empleando agua (símbolos negros) y etanol (símbolos blancos) como líquidos infiltrantes. **a.** En suelo no repelente al agua. **b.** En suelo repelente al agua. (Tomadas de **Moral et al.**, 2003).

el desarrollo de escorrentía puede verse afectado por la distribución de la repelencia al agua en el terreno.

Jaramillo (1992) observó en la cuenca de la quebrada Piedras Blancas (Medellín, Colombia), que la escorrentía no se presenta como la manifestación hidrológica más frecuente, a pesar de darse condiciones favorables a su desarrollo, como vertientes inclinadas, presencia de repelencia al agua de considerable extensión e intensidad y un clima húmedo, posiblemente porque (1): las lluvias, normalmente, no son de alta intensidad y por lo tanto el aporte no sobrepasa la capacidad de infiltración; (2): la hidrofobicidad se presenta, predominantemente, en forma de parches pequeños, lo que permite la entrada del agua por los cuerpos de suelo no repelentes a ella y su posterior redistribución al interior mediante el flujo lateral subsuperficial y/o (3): los Andisoles no repelentes al agua en esta cuenca tienen abundantes macroporos que actúan como vías de flujo preferencial y pueden movilizar rápidamente grandes volúmenes de agua.

Moral et al. (2003) establecieron el valor de la infiltración potencial⁴ que deberían presentar los suelos arenosos en España y encontraron que no estaban captando la cantidad de agua que les permitía su condición textural, por lo que estaban dejando un gran excedente de agua en su superficie, que se convertía en escorrentía y que inducía severas manifestaciones de erosión en el terreno estudiado (Tabla 2).

Tabla 2. Infiltración acumulada e infiltración potencial en un tiempo de 20 minutos en suelos arenosos repelentes al agua del Parque Natural Doñana, España. (Tomados de **Moral et al.**, 2003).

| Infiltración Media Acumulada (mm) | | Infiltración Potencial (mm) | |
|-----------------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|
| En campo | En laboratorio | En campo | En laboratorio |
| 3.24 | 0.45 | 16.49 | 6.54 |

Con respecto a la erosión, aunque se acepta el hecho de que la repelencia al agua puede favorecerla, **Shakesby et al.** (2000) identificaron tres aspectos que hacen difícil el estudio y entendimiento de la relación hidrofobicidad-erosión:

- Cuando se presenta repelencia al agua, su influencia rara vez es cuantificada y aislada de la influencia de otros posibles factores.
- No está claro si las medidas puntuales de la hidrofobicidad son importantes a la hora de explicar las

pérdidas de suelo en áreas de tamaños y propiedades variables: efecto de la escala de trabajo.

- La hidrofobicidad se manifiesta temporalmente, pudiendo desaparecer durante períodos importantes, cuando el suelo está sometido a humedecimiento intenso; durante estos períodos la relación hidrofobicidad-erosión no se puede estudiar, perdiéndose continuidad en las evaluaciones y dificultándose los estudios de largo plazo.

Shakesby et al. (2000) establecieron parcelas experimentales de diferentes tamaños en lotes bajo cobertura de pino (*Pinus pinaster*) y de eucalipto (*Eucalyptus globulus*), con pendientes comprendidas entre 14 y 22%; algunos sitios habían sufrido incendios fuertes dos años atrás. Sometieron las parcelas a simulación de lluvia y midieron las pérdidas de suelo, la cantidad de escorrentía producida y la cantidad de sedimentos en suspensión durante varios períodos (Tabla 3). Observaron que la hidrofobicidad era un factor activo en la erosión de los suelos que sufrieron quema, por haber incremento en el aporte de sedimentos susceptibles de ser transportados por los flujos de agua superficiales; el desprendimiento de partículas por salpicadura ("splash") en el simulador de lluvia fue 85 y 59% mayor, en promedio, en el suelo fuertemente repelente al agua (WDPT > 3600 s) que en su equivalente hidrofílico, al compararlos en pendientes horizontal y de 15°, respectivamente; el suelo hidrofílico se humedecía y se sellaba rápidamente, impidiendo la salpicadura, mientras que el hidrofóbico permanecía seco, no sellaba y, por tanto, era sometido a desprendimiento de partículas durante más tiempo, aún cuando se alcanzaba a formar una película de agua sobre él, lo que explica el comportamiento observado.

Shakesby et al. (2000) señalan que la magnitud del efecto que tiene la hidrofobicidad sobre la erosión depende fuertemente de la continuidad de la repelencia al agua en el terreno. Dicha continuidad afecta el tamaño del área de muestreo utilizada para estudiar esta relación, puesto que en parcelas grandes se pueden involucrar vías de flujo preferencial que captan parte del flujo superficial y lo transportan al interior del suelo, interrumpiendo la continuidad en la hidrofobicidad, por lo que en ellas dicho flujo puede tener valores mucho menores que en parcelas más pequeñas.

De acuerdo con **Shakesby et al.** (2000), la presencia de grietas, huecos, madrigueras, canales de raíces, macro poros y/o parches no hidrofóbicos pueden ser vías importantes de infiltración de agua en el suelo y, junto con la

⁴ **Infiltración potencial:** Infiltración que debería presentar el suelo, si no fuera repelente al agua, durante un período de tiempo de observación dado.

Tabla 3. Cantidad de partículas desprendidas por salpicadura en un simulador de lluvia, en suelos repelentes y no repelentes al agua de Portugal, sometidos a diferentes intensidades de lluvia y con dos gradientes de pendiente. (Datos tomados de **Shakesby et al.**, 2000).

| Pendiente | Lámina de agua aplicada (mm) | Tiempo de aplicación (min) | Rata de desprendimiento por salpicadura (g mm^{-1})* | | Relación de las tasas de desprendimiento entre suelos hidrofóbico/hidrofílico |
|------------|------------------------------|----------------------------|---|-------------------|---|
| | | | Suelo hidrofóbico | Suelo hidrofílico | |
| Horizontal | 3.5 | 10 | 0.333 | 0.169 | 1.97 |
| | 3.9 | 10 | 0.436 | 0.254 | 1.72 |
| | 4.1 | 10 | 0.769 | 0.434 | 1.77 |
| | 10.0 | 20 | 0.362 | 0.189 | 1.92 |
| | | | | | 1.85 Promedio |
| 15° | 4.4 | 15 | 0.418 | 0.253 | 1.65 |
| | 4.4 | 15 | 0.316 | 0.230 | 1.37 |
| | 7.7 | 20 | 0.385 | 0.280 | 1.38 |
| | 7.7 | 20 | 0.433 | 0.223 | 1.94 |
| | | | | | 1.59 Promedio |

* Gramos de material desprendido por milímetro de lámina de agua aplicado.

distribución de la vegetación en el terreno, son características críticas a la hora de definir el riesgo de erosión en suelos repelentes al agua. Cabe agregarle el espesor de la capa de hojarasca acumulada sobre el suelo pues, como lo observó **Jaramillo** (1992), en ella puede acumularse una buena cantidad de agua que, luego de un tiempo prolongado de contacto con el suelo hidrofóbico, puede cambiar su ángulo de contacto y penetrar en él. Una capa de hojarasca espesa es un disipador excelente de la energía con que llegan las gotas de lluvia al suelo y, como ya se mencionó, los suelos hidrofóbicos son disgregados fácilmente por ellas.

Estructura del suelo

Varios autores, señalan que la presencia de compuestos repelentes al agua contribuye al desarrollo de la estructura del suelo. **Baver et al.** (1973) y **Porta et al.** (1994) plantean la posibilidad de que la presencia de ceras, grasas y resinas impidan la disgregación de los agregados y aumenten así su estabilidad, al hacerlos impermeables al agua. **Hillel** (1998) destaca como uno de los mecanismos que ayudan en la formación y estabilización de la estructura del suelo, la cementación producida con materiales orgánicos que reducen la humectación de los agregados, actividad que llevan a cabo los compuestos hidrofóbicos.

Giovannini et al. (1983) sometieron algunas muestras de suelo repelente al agua (Luvisol gleic vertic, franco arcilloso) de Italia, bajo cobertura de pastos, a extracción selectiva con benceno y con una mezcla de acetilacetona en benceno. El benceno extrajo sustancias orgánicas hidrofóbicas y la mezcla extrajo, además de las anteriores, cementantes órgano-metálicos de Fe y Al. Cuando los extractos fueron aplicados a partículas de arena silicatada completamente humectables, se transformaron en repelentes al agua, demostrándose el carácter hidrofóbico de

ellos. Las muestras de suelo repelente al agua, después de haber sido sometidas a las extracciones, redujeron el valor del índice de estabilidad estructural utilizado hasta en 20% con benceno y hasta en 40% con la mezcla, en comparación con los índices obtenidos en muestras que no fueron sometidas a extracción, demostrándose el efecto estabilizador de la estructura en estos suelos por los cementantes extraídos.

A pesar de las evidencias presentadas, **Jaramillo** (1992) observó que una buena cantidad de los parches de los Andisoles repelentes al agua en la cuenca de la quebrada Piedras Blancas (Medellín, Colombia) se presentaban muy polvorientos en seco y con estructura poco desarrollada y de tamaño fino en húmedo, situación que lo llevó a pensar que se estaba presentando un deterioro de la estructura de los suelos cuando aparecía la repelencia al agua.

Para confirmar lo anterior, **Jaramillo** (2001a) estudió 21 muestras de Andisoles de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas (Medellín, Colombia): 18 fueron tomadas en suelos bajo cobertura de *Pinus patula* y 3 bajo cobertura de *Cupressus lusitanica*. Las muestras se secaron al aire, sin disturbarlas y se les determinó la hidrofobicidad por el método WDPT en esa condición de humedad: 16 muestras resultaron extremadamente repelentes al agua (WDPT > 3600 s), 4 fueron severamente repelentes (WDPT entre 600 y 3600 s) y una no fue repelente al agua (WDPT < 5 s).

Las muestras secadas al aire se sometieron a un cernido suave, en seco, durante un minuto, a través de un tándem de tamices; se pesó el material retenido en cada tamiz y se calculó el porcentaje representado por él, dentro de toda la muestra, con base en el peso seco al horno de toda la muestra. Con los resultados de distribución de agregados en seco se calcularon algunos índices que permitieron visualizar lo

que estaba pasando con su estructura. Los índices calculados mostraron que, en efecto, se presentaba degradación estructural en los suelos repelentes al agua, teniendo en cuenta que el tamizado se hizo en seco, casi todas las muestras (excepto una) presentaron más de 40% de los agregados con tamaños menores a 1.5 mm de diámetro; el Diámetro Medio Estimado para el 50% de los agregados, en promedio fue de 1.46 mm y el Porcentaje de Agregados Inestables (suma de agregados mayores de 2 mm y menores de 0.25 mm) promedio fue de 67.23% (Jaramillo, 2001a).

Roy *et al.* (2000) también encontraron en Canadá un fuerte deterioro estructural que se manifestó como una pulverización completa de los primeros centímetros superficiales (hasta 15 cm) del suelo, en 15 de los 27 sitios con suelos repelentes al agua.

Generación de vías de flujo preferencial

Según Doerr *et al.* (2000), el *flujo preferencial* es el movimiento vertical concentrado del agua por una vía preferencial, a través de la matriz del suelo. Las *vías de flujo preferencial* son caminos que permiten la concentración del flujo y el movimiento del agua (ver Figura 7). Se diferencian dos tipos de flujo preferencial:

- **Flujo en macroporos:** Es el movimiento a lo largo de grietas, canales o agujeros que son más grandes de lo que cabe esperar por la distribución de tamaño de partículas del suelo.
- **Flujo digitado** (o en forma de dedos): Es el movimiento que se produce en cuerpos aislados a través de un medio homogéneo.

El origen de las vías de flujo preferencial es muy variado (Dekker & Ritsema, 2000; Carrillo *et al.*, 2000a, b; Hendrickx & Dekker, 1991; Hendrickx *et al.*, 1993; Hillel, 1998; Selker *et al.*, 1999; Stephens, 1996):

- Puede tratarse de rasgos preexistentes en el suelo como lentes de arcilla o de arena, o en la roca, como fisuras, diaclasas, etc.
- Pueden formarse físicamente por agrietamiento de arcillas expansivas debido a procesos de humedecimiento y secamiento.
- Pueden formarse por actividad biológica como en la construcción de túneles o madrigueras por lombrices, hormigas, roedores y otros animales o por la presencia de canales dejados por la descomposición de las raíces.
- El hombre, mediante la manipulación del suelo, sobre todo por efecto de su mecanización, puede generar vías de flujo preferencial.

- Eventos geomorfológicos que alteran las vertientes como subsidencia o rupturas superficiales del terreno.
- Discontinuidades texturales en las que hay un horizonte superficial de textura más fina que la textura del horizonte que se encuentra por debajo de él.
- Frentes inestables de humedecimiento.
- Presencia de materiales repelentes al agua.
- Encharcamiento de agua en depresiones superficiales que incrementan la presión hidrostática que ayuda a la entrada del agua en el suelo.
- Diferencias en densidad aparente.
- Presencia de aire atrapado y comprimido por delante de un frente de humedecimiento.
- Presión de entrada de aire más negativa que el potencial de humedad del frente de humedecimiento.
- Incremento de la conductividad hidráulica con la profundidad.
- Intensidad de lluvia o de riego menor que la conductividad hidráulica.
- Redistribución de la infiltración al terminar un aguacero o un riego.
- Incremento en el contenido de humedad del suelo con la profundidad.

En los macroporos, el flujo, según Selker *et al.* (1999), puede mover cantidades considerables de agua; si un canal de una lombriz tiene 100 veces el diámetro de un poro fino intergranular, puede transportar 10 000 veces el flujo por unidad de área que mueve el suelo que está a su alrededor, bajo un flujo gravitacional.



Figura 7. Vías de flujo preferencial (áreas rojas) en suelos arenosos homogéneos de dunas de Holanda. Foto tomada de Dekker (1998).

El flujo digitado se relaciona más directamente con los suelos repelentes al agua y, según **Selker et al.** (1999), ocurre sólo en condiciones de no-saturación. **Hillel** (1998) indica que este tipo de flujo también se presenta cuando hay discontinuidad textural en el suelo, con un horizonte de textura más gruesa debajo de uno con textura más fina o cuando por delante de un frente de humedecimiento que está avanzando queda aire atrapado que lo frena diferencialmente.

Hill & Parlange, citados por **Selker et al.** (1999) y por **Hillel** (1998), notaron que cuando el agua entraba a un suelo de textura gruesa, seco o con poca humedad, ella tenía la tendencia a moverse en regiones aisladas que llamaron “dedos” y comprobaron que los dedos se forman cuando la velocidad frontal del flujo es menor que la conductividad hidráulica saturada del medio en que aquel se produce (ver Figura 8).

Cuando el suelo posee una capa de material repelente al agua intercalada entre capas de material humectable, si hay formación de dedos, éstos se desarrollan en la capa humectable que se encuentra por debajo de la capa repelente al agua (**Carrillo et al.**, 2000a, b).

Bauters et al. (1998) estudiaron el efecto del grado de repelencia al agua en el comportamiento del frente de humedecimiento de la infiltración en una arena cuarcítica y encontraron que la presencia o ausencia de hidrofobilidad en el suelo controló el ancho y la velocidad de los dedos, así como la presión de entrada del agua en dicho suelo (Tabla 4).

Una cualidad sobresaliente de los dedos es su *recurrencia*. **Ritsema & Dekker** (1996, 2000), **Ritsema** (1998) & **Wang et al.** (2003) comprobaron que, en arenas repelentes al agua, los dedos tienden a ubicarse en las mismas localizaciones durante sucesivos eventos de precipitación o de riego, aún cuando las diferencias en el contenido de humedad sean pequeñas. Atribuyen este comportamiento a la histéresis característica de la retención de humedad que tienen esos suelos y sostienen que esta recurrencia puede mantenerse por tiempo ilimitado, mientras que no se produzcan cambios drásticos, como por ejemplo, los que produce el laboreo en tierras de cultivo.

Según **Selker et al.** (1999), la importancia del flujo preferencial radica en que acelera el transporte de agua y de contaminantes a través de los materiales del suelo. Ade-

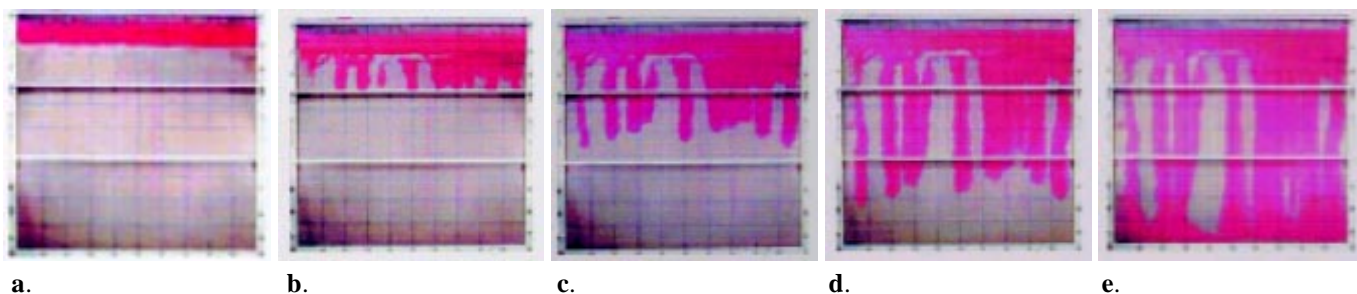


Figura 8. Formación de “dedos” por redistribución de 500 mL de agua con un colorante en una fracción de arena cuarcítica de entre 0.5 y 0.8 mm de diámetro, ligeramente humedecida antes de la aplicación del agua y empaquetada homogéneamente en una celda plástica de 1 x 1 x 0.01 m en laboratorio, en diferentes tiempos después de la aplicación. **a.** Tiempo cero: se aplicó el agua. **b, c, d** y **e**, corresponden al avance de los dedos a los 2, 6, 18 y 230 minutos después de aplicada el agua, respectivamente. Tomadas de **Wang et al.** (2003).

Tabla 4. Ancho, humedad y velocidad de crecimiento de los dedos formados en arenas cuarcíticas con diferente grado de repelencia al agua y presión de entrada del agua en ellas. Datos de **Bauters et al.** (1998).

| Repelencia al agua (%)* | WDPT (s) | Ancho del dedo (cm) | Contenido de humedad en el frente (cm ³ cm ⁻³) | Velocidad en el frente (cm min ⁻¹) | Presión de entrada de agua (cm) |
|-------------------------|----------|---------------------|---|--|---------------------------------|
| 0 | < 0.5 | 45 | 0.14 | 0.6 | -6.0 |
| 3.13 | 40 | 2.1 | 0.40 | 1.7 | -3.0 |
| 5.00 | 2400 | 2.8 | 0.41 | 3.1 | -1.0 |
| 5.68 | > 3600 | 2.7 | 0.38 | 3.6 | 2.0 |
| 9.01 | > 3600 | 3.55 | 0.38 | 5.5 | 5.0 |

* Se define por la cantidad de arena altamente repelente al agua que hay en una mezcla de ella con arena normal.

más, por tratarse de un flujo restringido a un pequeño volumen, la rata de movimiento vertical se incrementa enormemente, generándose menor absorción de agua en el suelo y, por lo tanto, menor disponibilidad de ella para las plantas.

Shakesby et al. (2000) establecieron la importancia que tienen los macroporos, como vías de flujo preferencial, en el movimiento de agua en suelos bajo cobertura boscosa. Citan datos de Ferreira quien registró, en un suelo seco de una plantación de pino que había sido quemada, una infiltración de 250 mm h⁻¹ encima de un canal de una raíz quemada de un tronco de árbol muerto, mientras que en el suelo repelente al agua que estaba alrededor, libre de raíces, la infiltración fue de 1.8 mm h⁻¹.

El comportamiento del flujo de agua en presencia de vías de flujo preferencial impone observar precauciones extremas cuando se quiere evaluar la infiltración del agua en el suelo con los anillos infiltrómetros; las diferencias en el flujo entre las vías preferenciales y el suelo normal pueden llevar a establecer modelos de infiltración erróneos. También, el tamaño de la muestra es definitivo en el resultado del ensayo. El incremento en la velocidad del flujo en el suelo y la disminución en el tiempo de contacto de éste con el agua, hacen que las reacciones entre estos dos componentes sean menos probables y menos eficientes, lo que hace que los pesticidas y contaminantes puedan llegar más fácilmente a los acuíferos, contaminándolos (**Selker et al.**, 1999). **Hendrickx et al.** (1993) comprobaron que la susceptibilidad a la contaminación de aguas subsuperficiales es mayor en suelos que tienen capas superficiales repelentes al agua. Aplicaron 15 L de una solución de KBr, con una concentración de 11 g Br L⁻¹, a 6 suelos arenosos de Holanda, 3 con una capa superficial repelente al agua y 3 sin ella, es decir, humectables; 5 semanas después de montado el ensayo y cuando los suelos habían recibido una precipitación acumulada de 120 mm, las cantidades de bromuro presentes en el nivel freático por debajo de las capas repelentes al agua eran entre 6 y 13 veces mayores que las encontradas en el nivel freático de los suelos que no tuvieron problemas de repelencia al agua.

Evaluación de la repelencia al agua en suelos

Para evaluar la hidrofobicidad **Jaramillo** (1996, 2004) cita varios de los métodos que se han propuesto aunque presentan limitaciones prácticas para su implementación. Para evaluaciones de rutina se han desarrollado algunos métodos prácticos y de fácil aplicación como el llamado **WDPT** (Water Drop Penetration Time) o el método conocido como **MED** (Molarity Ethanol Drop). Estos métodos son los de mayor utilización.

Para determinar el WDPT, que mide la persistencia de la repelencia, se colocan varias gotas de agua destilada sobre la superficie del suelo y se contabiliza el tiempo que gasta cada una de ellas en penetrar completamente. La persistencia de la repelencia al agua se establece con el tiempo promedio de todas las gotas utilizadas. Se presentan casos en los que el WDPT no se puede establecer con un valor absoluto; entonces hay que caracterizarlo con un valor condicionado (> : mayor que...), debido a que en tiempos largos las gotas empiezan a deformarse y reducen su tamaño por efecto de la evaporación, como lo observó **Jaramillo** (1992) en gran cantidad de suelos en la cuenca de la quebrada Piedras Blancas (Medellín, Colombia) que tuvieron WDPT > 10800 segundos. Ante esta situación, teniendo en cuenta la gran cantidad de valores que se pueden obtener en su determinación, **Dekker & Jungerius** (1990) propusieron clasificar la persistencia de la repelencia al agua en el suelo mediante el uso de las clases que se presentan en la Tabla 5.

El MED mide el grado o la severidad de la repelencia al agua y consiste en determinar la concentración (molaridad o porcentaje) de aquella solución de etanol que penetra en el suelo en 10 segundos o menos (según **King**, 1981 y **Roy & McGill**, 2002) o en 5 segundos o menos (según **Dekker & Ritsema**, 1994). **Jaramillo** (2001b), mediante análisis de regresión encontró que, en Andisoles, el tiempo límite de observación más adecuado era de 5 segundos. En las Tablas 6 y 7 se presentan dos sistemas utilizados ampliamente para caracterizar y clasificar la severidad de la repelencia al agua en el suelo.

Con cualquiera de los métodos, si la determinación se va a hacer en laboratorio, se recomienda que las muestras sean sometidas a un tamizado suave para trabajar sobre la fracción menor a 1 mm. Las determinaciones se ven afectadas por el contenido de humedad inicial de las muestras y por el tiempo que dure el tamizado, así como por la temperatura y la humedad relativa del espacio en que se hace la determinación. En todos los casos la variabilidad de las determinaciones es alta, aún tomando precauciones para controlar las condiciones bajo las cuales se hace la determinación.

Tabla 5. Clasificación del WDPT propuesta por **Dekker & Jungerius** (1990).

| Clase de persistencia | Nivel de persistencia de la repelencia al agua | Valores del WDPT (s) |
|-----------------------|--|----------------------|
| 0 | No repelente al agua | < 5 |
| 1 | Ligeramente repelente al agua | 5 – 60 |
| 2 | Fuertemente repelente al agua | 60 – 600 |
| 3 | Severamente repelente al agua | 600 – 3600 |
| 4 | Extremadamente repelente al agua | > 3600 |

Tabla 6. Clasificación de la severidad de la repelencia al agua evaluada por el método del MED y expresada como molaridad, propuesta por **King** (1981).

| Clase de severidad | Rango de valores del MED (M) |
|-----------------------|------------------------------|
| No repelente | 0 |
| Repelencia baja | 0.2 – 1.0 |
| Repelencia moderada | 1.2 – 2.2 |
| Repelencia severa | 2.4 – 3.0 |
| Repelencia muy severa | > 3.2 |

Tabla 7. Clases de severidad de la repelencia al agua, medida con el método del MED expresado en % de alcohol, utilizadas por **Dekker & Ritsema** (1994) y por **Dekker** (1998) en suelos arenosos de dunas de Holanda.

| Clase de grado de repelencia al agua* | Rango de valores de concentración de etanol (%) |
|---------------------------------------|---|
| No repelente | 0 |
| Ligeramente repelente | 1 – 3 |
| Moderadamente repelente | 4 – 6 |
| Fuertemente repelente | 7 – 14 |
| Severamente repelente | 15 – 20 |
| Extremadamente repelente | > 20 |

* Los nombres que se presentan para las clases no están descritos en los documentos citados en el título, sino que han sido propuestos por **Jaramillo** (2004).

Manejo de la repelencia al agua en el suelo

Evitar la acumulación excesiva de hojarasca sobre el suelo

Sabiendo que los compuestos hidrofóbicos que se acumulan en el suelo provienen principalmente de la descomposición inicial de la materia orgánica, si se evita la acumulación excesiva de este material, se minimiza el riesgo de que se desarrolle la repelencia al agua en el suelo.

Chan (1992) encontró un alto grado de repelencia al agua en un Alfisol que se había explotado bajo siembra directa (labranza cero) durante un largo tiempo, con lo que acumuló una importante capa de hojarasca que creó las condiciones óptimas para que se desarrollara en él una alta población fungal con una densa masa de hifas hidrofóbicas, situación que no se dio en el mismo suelo, bajo un sistema de laboreo convencional. **Hallett et al.** (2001) también observaron que aquellos suelos que no eran sometidos a mecanización presentaban mayores valores de índice de repelencia (IR) que los que sí se sometían a esta práctica.

La acumulación de materia orgánica fresca sobre el suelo se puede evitar de varias formas:

- Favoreciendo su descomposición rápida; el laboreo proporciona una buena aireación, facilitando la oxidación en la capa de hojarasca.
- La descomposición de la materia orgánica puede acelerarse si se promueve una buena actividad microbológica, por ejemplo, aportando nutrientes por medio de fertilizantes.
- Sometiendo el suelo a quemas controladas, es decir, con intensidad del fuego baja y cuando el suelo está húmedo.
- Otra forma de eliminar la hojarasca del suelo es, simplemente, extrayéndola del terreno.

Mecanización del suelo

En laboratorio se ha observado que la abrasión en los granos de arena reduce el grado de hidrofobicidad de los mismos (**King**, 1981; **Ma'shum & Farmer**, 1985; **Wallis et al.**, 1990a; **Crockford et al.**, 1991). En el campo, el laboreo puede cumplir esta función de abrasión sobre los agregados, removiendo algo de los recubrimientos orgánicos y/o de las hifas de hongos que tengan adheridos, reduciendo su grado de repelencia.

King (1981) notó que los agricultores en Australia reducían el grado de repelencia al agua sometiendo los suelos a laboreo durante la lluvia o inmediatamente después de ella, lo que puede estar relacionado con el efecto de abrasión mencionado y/o con un efecto de dilución de los agregados repelentes al agua en el resto del suelo, como lo sugieren varios trabajos citados por **Wallis & Horne** (1992).

Adicionar arcilla o materiales terrosos arcillosos

Otra práctica que ayuda a diluir el componente hidrofóbico es la adición de arcilla, cuando el suelo es de textura gruesa. El Departamento de Agricultura del Oeste de Australia (**DWA**, 2000) destaca que la adición de arcilla a suelos de textura gruesa repelentes al agua produce efectos como:

- Incrementar la producción en cultivos y pastos: La producción de cebada en un suelo tratado con arcilla se incrementó en 1.2 t ha⁻¹ y este incremento se mantuvo durante los 8 años siguientes a la aplicación del correctivo.
- Incrementar la infiltración de agua. En un suelo tratado con arcilla se incrementó 3 veces la rata de infiltración.

- El suelo se humedece uniformemente.
- La germinación de semillas de malezas es uniforme, lo que permite hacer un mejor control de ellas.
- Se controla la erosión eólica.
- Se aumenta la retención de nutrientes en el suelo.
- Se incrementa la actividad biológica en el suelo.

El mismo organismo ha establecido que la adición de arcilla al suelo superficial repelente al agua puede hacerse mezclando con él parte del subsuelo; la mezcla de 100 t ha⁻¹ de dicho material que contenga 30% de arcilla, con los primeros 10 cm del suelo, incrementa el contenido de arcilla entre 3 y 4%, cantidad suficiente para tener resultados positivos y estables durante los siguientes 8 años.

Ward & Oades (1993) en ensayos de laboratorio, encontraron que la caolinita saturada con Na⁺, en comparación con la montmorillonita, fue la arcilla más eficiente en el proceso de reducción de la repelencia al agua en los suelos arenosos. La aplicación del equivalente a 5 t ha⁻¹ de caolinita redujo la repelencia al agua a niveles tolerantes agrónomicamente (MED < 1.2 M), a pesar de que tiene menor superficie específica que la montmorillonita.

Aumentar el pH del suelo

También se ha ensayado el encalamiento como una alternativa de manejo para reducir el grado de repelencia al agua. En estudios de laboratorio se ha observado que solventes con cierto grado de alcalinidad son capaces de remover compuestos hidrofóbicos de la superficie de las partículas repelentes al agua (**Roberts & Carbon**, 1972).

Las diferencias en solubilidad que se presentan entre los ácidos húmicos y fúlvicos pueden sustentar el hecho de que aumentando el pH se pueda reducir el grado de repelencia al agua en el suelo, debido a que a pHs altos ambos grupos de compuestos son solubles y pueden ser removidos del suelo evitando que generen hidrofobicidad y favoreciendo su humectabilidad.

Los estudios llevados a cabo por **Karnok et al.** (1993) en parches hidrofóbicos de un campo de golf mostraron que la aplicación de soluciones de NaOH 0.1 M al suelo eleva su pH y reduce su grado de repelencia al agua, al tiempo que promueve una pérdida importante de materiales orgánicos en los que pueden ser eliminados parte de los compuestos hidrofóbicos responsables del fenómeno.

Agregar agentes humectantes

Los agentes humectantes, conocidos como *surfactantes* o *agentes de superficie activa*, son sustancias

anfifílicas cuyo grupo polar es hidrofílico y contiene una variedad de átomos como O, S, N o P, que se encuentran en grupos funcionales alcohol, ácido, sulfato, entre otros. La parte no polar es hidrofóbica o lipofílica y, en general, es un grupo hidrocarbonado de tipo alquil o alquil – benceno (**Salager**, 2002).

Para manejar los suelos repelentes al agua se ha recurrido al uso de surfactantes que al formar soluciones con el agua reducen su tensión superficial (**Tensoactivos**) de manera que, al colocar dicha solución en contacto con una superficie sólida e hidrofóbica, el ángulo de contacto se reduce considerablemente y el agua puede penetrar más fácilmente. La efectividad de los agentes humectantes depende del tipo de suelo, del tipo de producto, de la dosis y grado de dilución del producto, del método de aplicación, del tipo de cultivo y del manejo del riego. Además, la radiación ultravioleta y el movimiento de partículas de suelo por el viento pueden alterar la vida útil de los agentes humectantes en el suelo (**Wallis et al.**, 1990b; **Wallis & Horne**, 1992).

Kostka et al. (2002) aplicaron dos surfactantes comerciales (Primer 604 y Aqueduct) en las dosis recomendadas por los fabricantes, a suelos repelentes al agua de diferentes localidades de Estados Unidos de América, Holanda, Australia y Alemania. En todos los casos encontraron que se redujo el grado de repelencia durante el tiempo que duró el ensayo: 3 meses con Primer 604, aplicándolo mensualmente y 3 semanas con Aqueduct, aplicándolo semanalmente. Además, se incrementaron la rata de infiltración y la capacidad de almacenamiento de agua en los suelos y se redujeron las pérdidas de agua por evaporación y por escorrentía.

En la Figura 9 se aprecia el efecto que tuvo la aplicación de agentes humectantes sobre la rata de infiltración en un suelo franco arenoso, severamente repelente al agua, de California, elaborada con datos de **Letey et al.** (1962).

El efecto de los surfactantes sobre el grado de repelencia al agua ha sido bastante inconsistente en su comportamiento. Además, parece que su efecto no es muy duradero en lo que respecta a la disminución de la persistencia de la repelencia al agua: a los 3 ó 4 meses de aplicado, se vuelven a incrementar los valores de WDPT, con respecto a los obtenidos un mes después de la aplicación (**Kostka**, 2000). Además, a pesar de sus efectos benéficos, debe tenerse en cuenta que los agentes humectantes pueden tener efectos fitotóxicos, generados por contacto prolongado del producto con las hojas o por absorción del producto por las raíces.

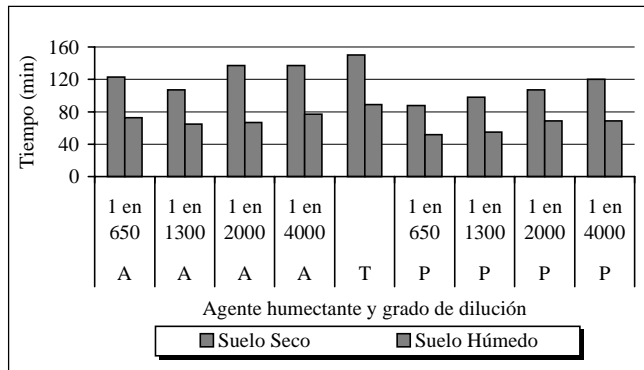


Figura 9. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de dos agente humectantes no identificados (A y P) sobre el tiempo gastado por 4 pulgadas de solución en penetrar en un suelo repelente al agua, bajo dos condiciones de humedad. En la condición de suelo húmedo la infiltración fue de agua sola pues para humedecerlo se aplicó la solución correspondiente al tratamiento del caso. La letra T identifica el testigo (sólo recibió agua). El grado de dilución corresponde a 1 parte del producto disuelto en las partes de agua indicadas. Ensayos hechos en basines, en campo. (Gráfica elaborada con base en datos de **Letey et al.**, 1962).

Aplicar riego

Wallis & Horne (1992) y **Wallis et al.** (1990b) plantean que en algunos sistemas de explotación, la aplicación de agua por medio del riego puede ser una alternativa viable para mantener el suelo en un estado de humedad que impida la manifestación de la repelencia al agua. Dicha práctica es frecuentemente usada en campos deportivos durante las épocas cálidas secas, con lo que se reduce la severidad de los parches secos. El uso de riegos livianos, con periodos de retorno cortos, es una práctica eficiente para reducir los efectos de la repelencia al agua, para favorecer el crecimiento de la vegetación y para mejorar la rata de infiltración en suelos repelentes al agua, que los sistemas con altas tasas de aplicación y periodos de retorno largos.

Cambiar el contenido orgánico del suelo

Franco et al. (2000) estudiaron el efecto que tenía la adición de carbono orgánico soluble (COS) sobre la repelencia al agua en arenas severamente hidrofóbicas. Para esto, sometieron arena extremadamente repelente al agua a un calentamiento de 70°C en agua, durante 2 horas; microfiltraron el sobrenadante cuando se enfrió y lo agregaron a 3 sustratos: arena repelente al agua, arena lavada con agua hasta remover todas las partículas de materia orgánica, y arena incinerada a 600°C hasta convertirla en arena completamente humectable. Se estableció un tratamiento testigo en el cual sólo se adicionó agua a cada tipo de arena y un control absoluto en el que no se

aplicó nada a los 3 tipos de arena. Los resultados de este experimento pueden verse en la Tabla 8.

En el anterior experimento la adición de COS a las arenas redujo de manera altamente significativa ($P < 0.01$) el valor del MED, con respecto al control absoluto. Este comportamiento sugiere la posibilidad de que cambiando el tipo de materia orgánica que se adiciona, se pueda tener una reducción importante en el grado de repelencia al agua en el suelo. Este cambio puede generarse modificando el tipo de cobertura vegetal como lo han sugerido **Jaramillo** (1992) y **Harper et al.** (2000), o adicionando abonos orgánicos aunque, esto debe ser estudiado cuidadosamente antes de recomendarlo como práctica de manejo de la repelencia al agua del suelo en condiciones de campo.

Extraer la parte del suelo que es repelente al agua

Otra actividad que puede resolver el problema de la repelencia al agua consiste en retirar la parte hidrofóbica. La aplicabilidad de esta alternativa está condicionada por el tipo de explotación que se tenga y, sobre todo, por el espesor y ubicación de la capa repelente en el suelo, por el área cubierta por el fenómeno y por el espesor del horizonte superficial del mismo. **Jaramillo** (1992) observó la realización de esta práctica en los Andisoles de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas (Medellín, Colombia) que se encontraban con plantaciones forestales de pinos y cipreses, conocida localmente como “**Extracción de tierra de capote**” y comprobó que, efectivamente, después de que el material superficial era retirado, el suelo “nuevo” al quedar expuesto era completamente humectable.

Debe tenerse en cuenta que con la extracción de tierra de capote se está trasladando el problema de la repelencia al agua a otros lugares y que, dependiendo del destino que tenga el material removido, se puede estar afectando alguna actividad productiva; por ejemplo, si el material retirado es utilizado en viveros, tanto para plantas orna-

Tabla 8. Efecto de la aplicación de carbono orgánico soluble (COS) sobre el MED de dos tipos de arena. Adaptado de **Franco et al.** (2000).

| Tratamiento | Valor del MED* (M) en | |
|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| | Arena repelente al agua | Arena lavada con agua |
| Control absoluto | 2.5 | 0.8 |
| Testigo con sólo agua | 1.0 | 0.2 |
| Con COS | 0.3 | 0.0 |

* En la arena incinerada no hubo cambios en el MED, en todos los tratamientos fue igual a cero.

mentales como para plantaciones forestales o para cultivos que requieran trasplante, se pueden generar unas pérdidas altas de material vegetal por un suministro insuficiente de agua a las plántulas.

Conclusión

La repelencia al agua en los suelos es un fenómeno frecuente, del cual se conoce y entiende poco. Puede tener efectos notables sobre la productividad y la producción agropecuaria y forestal, sobre la erosión y sobre el comportamiento hidrológico del suelo. Su variabilidad, la manera como se expresa en el campo y el comportamiento que presenta este fenómeno hacen difícil su detección, su evaluación y su manejo y, sobre todo, generan dificultades en la modelación de ciertos atributos del suelo, útiles para hacer un uso eficiente y racional del mismo.

Bibliografía

- Bauters, T. W. J.; D. A. Dicarlo; T. S. Steehuis & J. Y. Parlange.** 1998. Preferential flow in water repellent sands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **62**: 1185-1190.
- Baver, L. D.; W. H. Gardner & W. R. Gardner.** 1973. Física de Suelos. 1a. ed. Española. UTEHA, México. 529 p.
- Bisdorn, E. B. A.; L. W. Dekker & J. F. Th. Schoute.** 1993. Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. *Geoderma* **56**: 105-118.
- Blake, J.** 2002. Water-repellent soils symptom of decline. [En línea]. Ground Cover N° 40. Grains Research and Development Corporation. Australia. [Consultada en septiembre de 2004]. Disponible en: <http://www.grdc.com.au>
- Caballero, B.** 2005. Variabilidad espacial de la hidrofobicidad en Andisoles bajo tres coberturas vegetales. Tesis Ingeniero Agrónomo. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 40 p.
- Carrillo, M. L. K.; J. Letey & S. R. Yates.** 2000a. Unstable water flow in a layered soil: I. Effects of a stable water repellent layer. *Sci. Soc. Am. J.* **64**: 450-455.
- . 2000b. Unstable water flow in a layered soil: II. Effects of a unstable water repellent layer. *Sci. Soc. Am. J.* **64**: 456-459.
- Chan, K. Y.** 1992. Development of seasonal water repellence under direct drilling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **56**: 326-329.
- Crockford, H.; S. Topalidis & D. P. Richardson.** 1991. Water repellency in a dry sclerophyll eucalypt forest - measurements and processes. *Hydrological Processes*. **5**: 405-420.
- DeBano, L. F.** 1971. The effect of hydrophobic substances on water movements in soil during infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **35**: 340-343.
- . 1981. Water repellent soils: a state - of - the -art. USDA. Forest Service. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. General Technical Report PSW - 46. California. 21p.
- . 2000. Water repellency in soils: a historical overview. *J. Hydrol.* **231-232**: 4-32.
- Dekker, L. W.** 1998. Moisture variability resulting from water repellency in Dutch soils. Doctoral Thesis. Wageningen Agricultural University. The Netherlands. 240 p.
- . & **P. D. Jungerius.** 1990. Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands. *Catena Supplement* **18**: 173-183.
- Dekker, L. W. & C. J. Ritsema.** 1994. How water moves in a water repellent sandy soil. I. Potential and actual water repellency. *Water Resour. Res.* **30** (9): 2507-2517.
- . 1995. Fingerlike wetting patterns in two water-repellent loam soils. *J. Environ. Qual.* **24**: 324-333.
- . 2000. Wetting patterns and moisture variability in water repellent Dutch soils. *J. Hydrol.* **231-232**: 148-164.
- Dekker, L. W.; S. H. Doerr; K. Oostindie; A.K. Ziogas & C. J. Ritsema.** 2001. Water repellency and critical soil water content in a dune sand. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **65**: 1667-1674.
- Department of Agriculture Western Australia (DAWA).** 2000. Claying water repellent soils. [En línea]. Department of Agriculture Western Australia. [Consultada en noviembre de 2003]. Disponible en: <http://www.agric.wa.gov.au>
- Doerr, S. H. & A. D. Thomas.** 2000. The role of soil moisture in controlling water repellency: new evidence from forest soils in Portugal. *J. Hydrol.* **231-232**: 134-147.
- Doerr, S. H.; R. A. Shakesby & R. P. D. Walsh.** 2000. Soil water repellency, its characteristics, causes and hydro-geomorphological consequences. *Earth Sci. Rev.* **51**: 33-65.
- Franco, C. M. M.; P. P. Michelsen & J. M. Oades.** 2000. Amelioration of water repellency: application of slow-release fertilizers to stimulate microbial breakdown of waxes. *J. Hydrol.* **231-232**: 342-351.
- Giovannini, G.; S. Lucchesi & S. Cervelli.** 1983. Water - repellent substances an aggregate stability in hydrophobic soil. *Soil Science* **135** (2): 110-113.
- Hallett, P. D.; T. Baumgartl & I. M. Young.** 2001. Subcritical water repellency of aggregates from a range of soil management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **65**: 184-190.
- Harper, R. J.; I. McKissock; R. J. Gilkes; D. J. Carter & P. S. Blackwell.** 2000. A multivariate framework for interpreting the effects of soil properties, soil management and landuse on water repellency. *J. Hydrol.* **231-232**: 371-383.
- Hendrickx, J. M. H. & L. W. Dekker.** 1991. Experimental evidence of unstable wetting fronts in homogeneous non-layered soils. In: Proceedings of ASAE National Symposium on Preferential Flow. Chicago. pp: 22-31.
- . & **O. H. Boersma.** 1993. Unstable wetting fronts in water-repellent field soils. *J. Environ. Qual.* **22**: 109-118.
- Hillel, D.** 1998. Environmental soil physics. Academic Press. San Diego, U.S.A. 771 p.
- Jaramillo, J. D. F.** 1992. Relación entre la acumulación de acículas (litter) de *Pinus patula* y la hidrofobicidad en algunos Andisoles de Antioquia. Tesis Magister en Suelos y Aguas. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Palmira. 95 p.
- . 1996. Algunos estudios sobre repelencia al agua en Andisoles de Antioquia. Trabajo de promoción a Profesor Titular. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 311 p.

- _____. 2001a. Efecto de la repelencia al agua sobre la estructura en los Andisoles. *Revista del ICNE* 7 (1): 71-88.
- _____. 2001b. Evaluación del método MED para medir el grado de repelencia al agua de Andisoles del oriente antioqueño. *Revista del ICNE* 7 (1): 51-62.
- _____. 2003. Efecto de la temperatura de secado del suelo sobre la repelencia al agua en Andisoles bajo cobertura de *Pinus patula*. Informe de investigación. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 36 p.
- _____. 2004. Repelencia al agua en suelos: con énfasis en Andisoles de Antioquia. Informe de Año Sabático. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 197 p.
- _____. 2005. Humedad crítica y repelencia al agua en Andisoles bajo cobertura de *Pinus patula*. En Prensa. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín.
- _____. ; **L. W. Dekker; C. J. Ritsema & J. M. H. Hendrickx.** 2000. Occurrence of soil water repellency in arid and humid climates. *J. Hydrol.* 231-232: 105-111.
- Karnok, K. A.; E. J. Rowland & K. H. Tan.** 1993. High pH treatment and the alleviation of soil hydrophobicity on golf greens. *Agron. J.* 85: 983-986.
- King, P. M.** 1981. Comparison of methods for measuring severity of water repellence of sandy soils and assessment of some factors that affect its measurement. *Aust. J. Soil Res.* 19: 275-285.
- Kostka, S. J.** 2000. Amelioration of water repellency in highly managed soils and the enhancement of turfgrass performance through the systematic application of surfactants. *J. Hydrol.* 231-232: 359-368.
- _____. ; **L. W. Dekker; K. Oostindie; C. J. Ritsema; C. M. Miller & D. E. Karcher.** 2002. Advances in understanding and managing water repellent soils. [En línea]. (s.n.). [Consultada en noviembre de 2003]. Disponible en: <http://www.aquatrols.com/ResearchInfo/UnderstandingWaterRepellency.html>
- Letey, J.; N. Welch; R. E. Pelishek & J. Osborn.** 1962. Effect of wetting agents on irrigation of water repellent soils. *Cal. Agric.* 16 (12): 12-13.
- Ma'Shum, M. & V. C. Farmer.** 1985. Origin and assessment of water repellency of a sandy south Australian Soil. *Aust. J. Soil Res.* 23: 623-626.
- Moral, G. F. J.; F. López; E. Martínez De S. & A. Marcos.** 2003. Influencias hidrológicas y ambientales de la repelencia al agua en los suelos arenosos. [En línea]. Universidad de Extremadura. (s.n.). [Consultada en agosto de 2003]. Disponible en: <http://www.unizar.es>
- Pérez, D. V.; S. M. Simão & A. Salatino.** 1998. Identificação e caracterização da repelencia à água em alguns solos brasileiros. *R. Bras. Ci. Solo* 22: 197-207.
- Porta, J.; M. López-Acevedo & C. Roquero.** 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 807 p.
- Ritsema, C. J.** 1998. Flow and transport in water repellent sandy soils. Doctoral Thesis. Wageningen Agricultural University. The Netherlands. 215 p.
- _____. & **L. W. Dekker.** 1996. Water repellency and its role in forming preferred flow paths in soils. *Aust. J. Soil Res.* 34: 475-487.
- _____. 2000. Preferential flow in water repellent sandy soils: principles and modeling implications. *J. Hydrol.* 231-232: 308-319.
- Roberts, F. J. & B. A. Carbon.** 1972. Waters repellence in sandy soils of south-western Australia. *Aust. J. Soil Res.* 10: 35-42.
- Roy, J. L. & W. B. McGill.** 1998. Characterization of disaggregated nonwetttable surface soils found at old crude oil spill sites. *Can. J. Soil Sci.* 78: 331-334.
- _____. 2002. Assessing soil water repellency using the molarity of ethanol droplet (MED) test. *Soil Sci.* 167: 8397.
- _____. ; **H. A. Lowen & R. L. Johnson.** 2000. Hydrophobic soils: Site characterization and tests of hypotheses concerning their formation. Final report on PTAC RFP #9 (1999/2000). Petroleum Technology Alliance Canada (PTAC) – Canadian Association of Petroleum Producers (CAPP) – Environmental Research Advisory Council (ERAC). Alberta. Canadá. 87 p.
- Salager, J. L.** 2002. Surfactantes: Tipos y usos. Cuaderno FIRP S300-A. Laboratorio de formulación, interfases, reología y procesos. Universidad de Los Andes. Mérida. Venezuela. 53 p.
- Scott, D. F.** 2000. Soil wettability in forested catchments in South Africa; as measured by different methods and as affected by vegetation cover and soil characteristics. *J. Hydrol.* 231-232: 87-104.
- Selker, J. S.; C. K. Keller & J. T. McCord.** 1999. Vadose zone processes. Lewis Publishers. Florida. 339 p.
- Shakesby, R. A.; S. H. Doerr & R. P. D. Walsh.** 2000. The erosional impact of soil hydrophobicity: current problems and future research directions. *J. Hydrol.* 231-232: 178-191.
- Stephens, D. B.** 1996. Vadose zone hydrology. Lewis Publishers. Florida. 347 p.
- Vanegas, V. H. A.** 2003. Efecto de la temperatura de secado de Andisoles bajo dos coberturas vegetales sobre el grado de hidrofobicidad que desarrollan. Tesis Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 61 p.
- Wallis, M. G.; D. J. Horne & K. W. McAuliffe.** 1990a. A study of water repellency and its amelioration in a yellow-brown sand. I: Severity of water repellency and the effects of wetting and abrasion. *New Zealand J. Agric. Res.* 33: 139-144.
- _____. 1990b. A study of water repellency and its amelioration in a yellow-brown sand. II: Use of wetting agents and their interaction with some aspects of irrigation. *New Zealand J. Agric. Res.* 33: 145-150.
- Wallis, M. G. & D. J. Horne.** 1992. Soil water repellency. *Advances Soil Sci.* 20: 91-146.
- Wang, Z.; A. Tuli & W. A. Jury.** 2003. Unstable flow during redistribution in homogeneous soil. *Vadose Zone J.* 2: 52-60.
- Ward, P. R. & J. M. Oades.** 1993. Effect of clay mineralogy and exchangeable cations on water-repellency in clay-amended sandy soils. *Aust. J. Soil Res.* 31: 351-364.
- Watson, C. L. & J. Letey.** 1970. Indices for characterizing soil water repellency based upon contact angle - surface tension relationships. *Soil Sci. Soc. Am. P.* 34: 841-844.
- Wilkinson, J. F. & R. H. Miller.** 1978. Investigation and treatment of localized dry spots on sand golf greens. *Agron. J.* 70: 299-304.

Recibido el 3 de febrero de 2006.

Aceptado para su publicación el 10 de abril de 2006.

APLICACIÓN DE MEDIDAS REPETIDAS A CUATRO PROPIEDADES EDÁFICAS EN LOS MANGLARES DEL BRAZO CALANCALA, RÍO RANCHERÍA

por

Mauricio A. Ruiz-Ochoa¹, Rafael A. Meléndez¹, Martha L. Castellanos¹,
Jaime H. Polanía²

Resumen

Ruiz-Ochoa, M.A., R. Meléndez, M. Castellanos, J. Polanía: Aplicación de medidas repetidas a cuatro propiedades edáficas en los manglares del brazo Calancala, río Ranchería. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **30** (115): 233-242. 2006. ISSN 0370-3908.

Se analizaron las varianzas de medidas repetidas en el tiempo de cuatro propiedades edáficas (salinidad, CE, MO y pH) en los manglares del brazo Calancala, delta del río Ranchería. Revisado el supuesto de esfericidad, los resultados indican tendencias de cambio en el periodo observado en las cuatro propiedades edáficas. Las diferencias debidas al tiempo influyen en la vegetación y pueden asociarse a la hidrodinámica del brazo Calancala.

Palabras clave: ANOVA de medidas repetidas, esfericidad, propiedades edáficas, manglar, Caribe colombiano.

Abstract

The variances of repeated measurements in time of four edaphic properties (salinity, EC, OM, and pH) in the mangroves of Calancala branch, Ranchería River delta, were analyzed. As the sphericity assumption was reviewed, the results indicate change trends along the observation period in all four edaphic properties. Differences that can be ascribed to time do influence the vegetation and can be associated to the hydrodynamics of the Calancala branch.

Key words: ANOVA of repeated measurements, sphericity, edaphic properties, mangrove, Colombian Caribbean.

¹ Centro de Investigaciones. Universidad de La Guajira. Km 5 vía a Maicao. Riohacha. Colombia. Telefax (+57-5) 7285306. Correo electrónico: mandresruiz@hotmail.com, melendez24@hotmail.com, marthaligia123@terra.com.

² Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Correo electrónico: jhpolaniav@unalmed.edu.co.

Introducción

La teoría de análisis de varianza de medidas repetidas es muy conocida en un contexto general, y se puede usar cuando se realizan múltiples observaciones sobre la misma unidad experimental (en adelante UE) en diferentes periodos (Crowder & Hand, 1990), donde se tendrán datos completamente correlacionados (Underwood, 1981; Moser *et al.*, 1990). El análisis de medidas repetidas se ha aplicado con un interés explícito en la repuesta sobre el tiempo (von Ende, 1993) en campos como la biología (Underwood, 1981; Vilela *et al.*, 2000), las ciencias ambientales (Giraldo, 1995; Giraldo & Campos, 1997), las ciencias sociales (Guthrie, 1981; Fox, 1984; Benavides & López, 1994; Field, 1998; Arias & Fuentes, 1999; Jimerson & Bond, 2001), la medicina (Keselman & Keselman, 1984; Church & Schwenka, 1986; Cnaan *et al.*, 1997; Wallewnstein & Fisher, 1997; Otero *et al.*, 2000; Azeka *et al.*, 2002; Murano *et al.*, 2004; Stip *et al.*, 2005), la odontología (Maple *et al.*, 2005) y la zoología (Gill & Hafs, 1971), entre otros. En la ciencia del suelo algunas observaciones se hacen a través del tiempo sobre la misma UE, pero son analizados mediante gráficos simples o por medio de análisis univariados de varianza ANOVA o regresión, y se ignora información potencialmente disponible concerniente a la tendencia sobre el tiempo (Giraldo & Campos, 1997) y es frecuente que se violen los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza de los análisis univariados (Gurevich & Chester, 1986), lo que conduce a estimaciones erróneas de la suma de cuadrados medios y de los valores de F y a pruebas de hipótesis no confiables (Fox, 1984). Además, se requiere que las medidas sean independientes (Moser *et al.*, 1990).

Se presenta la aplicación de la técnica de medidas repetidas sobre las variables salinidad, conductividad eléctrica (en adelante CE), materia orgánica (en adelante MO)

y pH del suelo en los manglares del brazo Calancala, delta del río Ranchería. Las cuatro propiedades edáficas se consideraron porque dentro del trabajo de pregrado del primer autor (Martínez-Ramos & Ruiz-Ochoa, 2001), presentaron tendencia de cambio en el tiempo. Sin embargo, este manuscrito hace énfasis en el aspecto estadístico, más que en el edáfico, del estudio.

Materiales y Métodos

A lo largo de cuatro épocas climáticas, entre jul/00 y jun/01, fueron medidas las variables salinidad (mg L^{-1}), CE (mS cm^{-1}), MO (%) y pH dentro de un corredor de 28 UE de 20 x 20 m, ubicado perpendicularmente al brazo Calancala, que se localiza a 2 km de la cabecera municipal de Riohacha (fig. 1), entre las coordenadas geográficas $11^{\circ}33'42''$ N y $72^{\circ}53'43''$ W (Sánchez-Páez *et al.*, 1997). El régimen climático es bimodal, con mayor precipitación entre septiembre y noviembre y menor precipitación de mayo a junio (IDEAM, 1997).

En el centro de cada UE se tomaron 500 g de suelo hasta una profundidad de 15 cm (V. Rivera-Monroy, com. pers.), con un nucleador (tubo de PVC) de 2" de diámetro. Las muestras fueron empacadas, marcadas, selladas, debidamente refrigeradas en bolsas plásticas y procesadas en el Laboratorio Ambiental de la Corporación Autónoma Regional de La Guajira (CORPOGUAJIRA) y se aplicaron los métodos relacionados en la tabla 1 (Martínez-Ramos & Ruiz-Ochoa, 2001; Martínez-Ramos *et al.*, 2003). Para la determinación de estas variables, el suelo se secó en la estufa (Blue M Electric, Model OV-18A, rango de temperatura de 38-288°C) hasta obtener peso constante.

En el mes de jul/00, se hizo una descripción del perfil del suelo a partir de una calicata ubicada en la UE 27, es decir al final del corredor. Las dimensiones de las calicatas

Tabla 1. Métodos utilizados en la determinación de las cuatro propiedades edáficas del manglar en el brazo Calancala, delta del río Ranchería, de julio/00 hasta junio/01.

| Propiedad | Método | Referencias |
|----------------|---|---|
| Humedad | Secado a 105°C hasta peso constante. | IGAC (1979; 1990), ICONTEC (1983), González (1994). |
| Salinidad y CE | Potenciómetro. Salinidad y conductividad eléctrica (Tetra Con 325 $1 \mu\text{S cm}^{-1}$ a 500 mS cm^{-1} y desde -5°C hasta 80°C). | IGAC (1990). |
| MO | Calcinación a 550°C en mufla. | Boto (1984), Dewis y Freitas (1984), Grimshaw (1989). |
| pH | Potenciómetro. Multiparamétrico WTW P4 con el electrodos pH Sen Tix 41-3 (0-14). | IGAC (1990). |

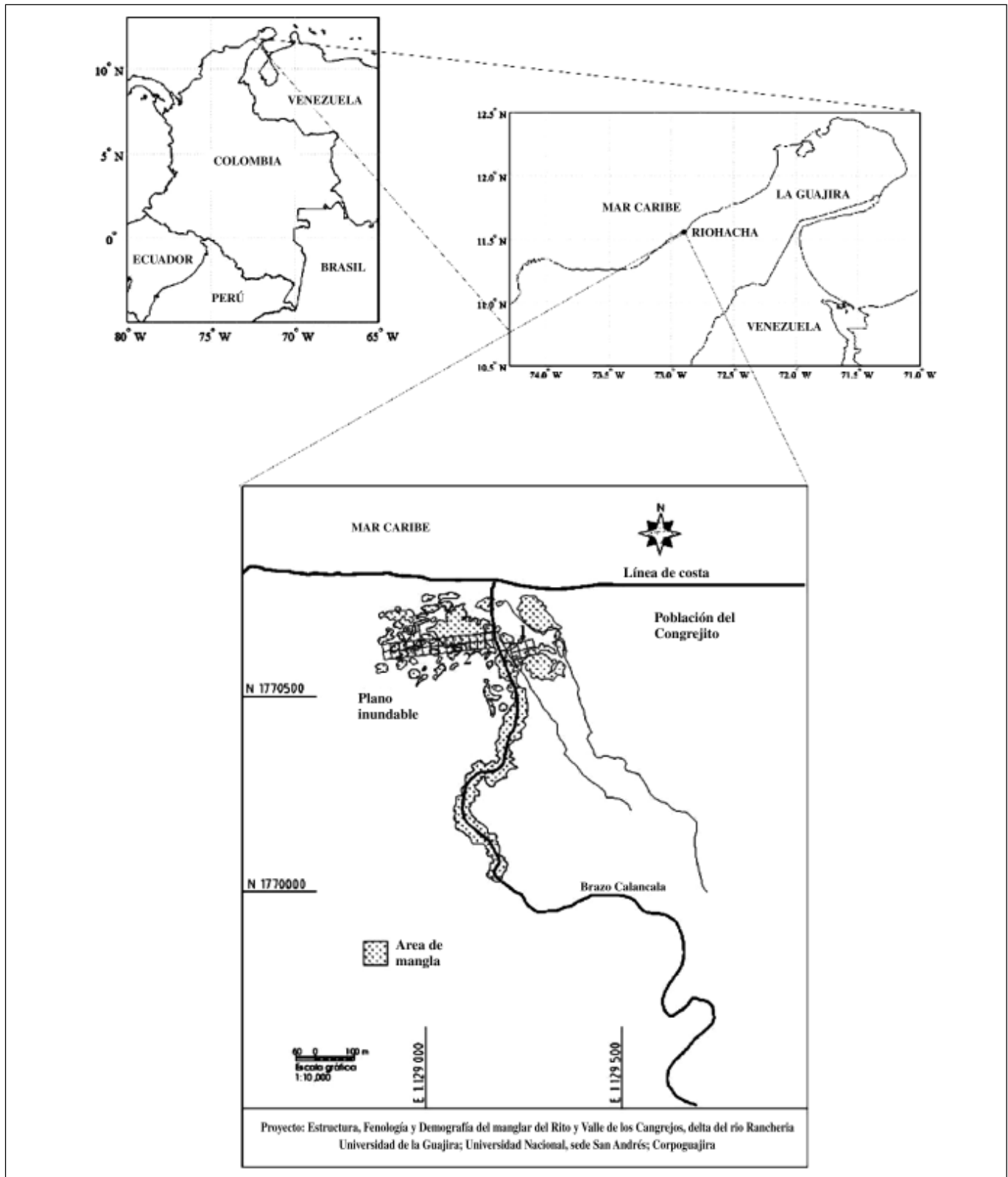


Figura 1. Ubicación del sitio de muestreo dentro del brazo Calancala, municipio de Riohacha, península de La Guajira.

fueron 1 m² de superficie por 1 m de profundidad (Martínez-Ramos & Ruiz-Ochoa, 2001).

Con los datos de las cuatro variables edáficas, se realizó la prueba de esfericidad y el análisis de varianza de medidas repetidas. El modelo de medidas repetidas es igual al clásico de observaciones independientes, pero con un parámetro adicional τ_j introducido para todos los efectos por el uso de la misma UE bajo diferentes condiciones (Montgomery, 1991; Moreno, 1993).

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_j + \tau_j + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

Donde $i = 1, \dots, n$ individuos
 $j = 1, \dots, p$ niveles o tratamientos

Si las diferencias entre los niveles están correlacionadas a través de los tratamientos (tiempo), entonces los contrastes usados para probar la hipótesis no deberían ser independientes uno del otro (Underwood, 1981; Maxwell & Delaney, 2004).

La esfericidad dentro del modelo anterior supone que, es decir existe una relación especial entre las respuestas dentro de los niveles de las variables que está implícita en el modelo de la matriz de varianzas y covarianzas (Weinfurt, 1995). Por tanto esta matriz es diagonal y los elementos son constantes (Montgomery, 1991; Moreno, 1993). Además, los datos deben mostrar el criterio del componente simétrico o el circulatorio. Para el simétrico, las varianzas y covarianzas serán iguales en cada nivel del factor de medidas repetidas y en dentro de cada grupo, en cuanto al circulatorio, el valor de $\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \text{cov}(x_1, x_2)$ será el mismo para cada par de niveles dentro del factor (Maxwell & Delaney, 2004).

Una de las pruebas más conocidas para probar la hipótesis de esfericidad es Mauchly (1940), tiene como estadístico:

$$W = (\det R) / |q^{-1} \text{traza } R|^q \quad (2)$$

Donde $q = p - 1$
 $R = CSC^T$
 $C =$ matriz de contrastes ortogonales $q \times p$.

Las tablas para W están dadas en Nagarseker & Pillai (1973). Otro estadístico es Crowder & Hand (1990):

$$\{ \sum (n_g - 1) - n \} \text{Log } W \quad (3)$$

Donde $n_g =$ números de varianzas distribuida asintóticamente como χ_v^2 con

$$v = \frac{1}{2} (q - 1)(q + 2) \text{ grados de libertad.}$$

Si se rechaza la hipótesis de esfericidad, la prueba de los efectos principales y las interacciones dentro de cada

factor presentan un aumento en la tasa del error tipo I, porque el valor de F es inflado (Box, 1954). El supuesto de esfericidad frecuentemente no aparece en el diseño de medidas repetidas (Maxwell & Delaney, 2004). Una forma de resolver el problema es aplicar un ajuste de los grados de libertad del factor epsilon ε (Box, 1954), a través de los estimadores Greenhouse & Geisser (1959) o Huynh & Feldt (1970). Un valor ε igual a 1, indica que el supuesto de esfericidad fue encontrado (Box, 1954; Kirk, 1982). Una estimación de ε está dada por:

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon(S) \quad (4)$$

Donde S es la matriz de varianzas y covarianzas muestral.

Cuando la estimación de ε está sesgada se sobreestimar los grados de libertad, que producen pruebas más conservadores si $\varepsilon > 0.75$ y $\eta < 2p$ (Box, 1954). Una alternativa para la estimación de un ε menos sesgado y menos dependiente de un h grande, está dado por Crowder & Hand (1990):

$$\hat{\varepsilon} = \min(1, a/b) \quad (5)$$

Donde $a = n(p - 1) \hat{\varepsilon} - 2$

$$b = (p - 1) \{ n - G - (p - 1) \hat{\varepsilon} \}$$

Para simplificar el análisis cuando se involucran medidas repetidas sobre la misma UE se usan los polinomios ortogonales (Steel & Torrie, 1988). El procedimiento consiste en generar nuevas variables a través de sumas ponderadas de las observaciones sobre el mismo individuo, por medio de los coeficientes de los polinomios y realizar con éstas el análisis de varianza tradicional (Gurevich & Chester, 1986).

La hipótesis de interés de este trabajo fue: determinar si existen diferencias significativas o cambios significativos en los promedios de las variables salinidad, CE, MO y pH del suelo en el manglar del brazo Calancala a través de los diferentes periodos climáticos (tiempo). Para probarla se utilizaron los ponderadores de los coeficientes de comparación ortogonales para tratamientos igualmente espaciados (Steel & Torrie, 1988; Moreno, 1993), para cuatro niveles (correspondientes a las épocas climáticas) y se generaron los efectos polinomiales (lineal, cuadrático y cúbico) de las observaciones tomadas en cada UE (Montgomery, 1991). Con las nuevas variables se probó la hipótesis de no efecto en el tiempo. La hipótesis de que todas las medias son iguales a cero, es equivalente a pro-

bar que las hipótesis de tendencia lineal, cuadrática y cúbica son iguales a cero (Crowder & Hand, 1990), y los valores medios de las variables no cambian durante el experimento (Gurevich & Chester, 1986). Para el análisis de los datos se utilizó el software SYSTAT 9.0 (SPSS, 1999).

Resultados y Discusión

En la Tabla 2 se describe el perfil del suelo realizado en la UE 27. Se encontró que las variaciones en el perfil del suelo pueden estar controladas por la hidrodinámica del brazo Calancala y sus aportes de sedimentos y partículas (Maza & Zárate, 2001), la acumulación de MO con poco grado de descomposición y las reducciones de hierro dadas a medida que se profundiza (Martínez-Ramos & Ruiz-Ochoa, 2001). Las texturas encontradas en campo y las determinadas en laboratorio no difieren de los registros IGAC (1998) para los suelos de Riohacha. Las variaciones de color en la profundidad del perfil son indicadoras de las limitaciones del drenaje interno y de las condiciones óxido-reductoras (Martínez-Ramos & Ruiz-Ochoa, 2001).

El nivel freático estuvo cercano a 1 m. El suelo estaba cubierto de *Avicennia germinans*, *Batis maritima* (Lema,

2000; Lema *et al.*, 2003) y pajas. Se encontraron arcillas 2:1 de origen aluvial. La superficie presentó moteados oscuros, indicador de contenido de MO con poco grado de descomposición (Martínez-Ramos & Ruiz-Ochoa, 2001). Con la información obtenida entonces, la cual es una aproximación en la determinación taxonómica del suelo, puesto que este aspecto no se contempló entre los objetivos del trabajo, se puede decir que hacen parte de los *Udorthents* (USDA y NRCS, 1998).

Mediante la prueba de Mauchly (1940) se rechazó la hipótesis de que los datos presentan esfericidad (tabla 3), es decir, las varianzas de los diferentes puntos muestreados no son homogéneas (Kirk, 1982), en este caso se podría aplicar el análisis multivariado que no se afecta por el supuesto de esfericidad (Box, 1954), o la estadística univariada. Aunque es preferible usar la aproximación univariada porque en condiciones de esfericidad, el estadístico univariado F es más potente que los estadísticos multivariados, sobre todo en muestras pequeñas (Crowder & Hand, 1990).

Sin embargo, asumir el método de Greenhouse & Geisser (1959) es la opción más conservadora, y los grados de libertad del factor (tanto los del numerador como los del denominador) se ajustan mediante la multiplica-

Tabla 2. Descripción del perfil del suelo en la UE 27, dentro del manglar del brazo Calancala, delta del río Ranchería, realizada en julio de 2000.

| Profundidad (cm) | Color | Estructura | Textura | Nomenclatura |
|------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------|--------------|
| 0 – 15 | Pardo (P) moteados amarillos. | Angulares –subangulares. | FArL | Ap1 |
| 15 – 20 | P moteados amarillos. | Subangulares – fina – muy fina. | ArL | Ap2 |
| 20 – 30 | P moteados grises. | Sin estructura. | Ar | Ct1 |
| 30 – 45 | P oscuro (O) moteados grises. | Sin estructura. | Ar | Ct2 |
| 45 – 68 | PO moteados grises. | Sin estructura. | F | Cg1 |
| 68 – 100 | Gris. | Sin estructura. | L | Cg2 |

Tabla 3. Prueba de Mauchly al evaluar la esfericidad en salinidad (mg L⁻¹), CE (mS cm⁻¹), MO (%) y pH con los estimadores Greenhouse-Geisser y Huynh-Feldt.

| Variables | Mauchly | χ^2 | g.l | p-Valor | ϵ | |
|-----------|---------|----------|-----|---------|--------------------|-------------|
| | | | | | Greenhouse-Geisser | Huynh-Feldt |
| Salinidad | 0.057 | 73.689 | 5 | 0.000 | 0.422 | 0.433 |
| CE | 0.056 | 73.977 | 5 | 0.000 | 0.421 | 0.432 |
| MO | 0.465 | 19.683 | 5 | 0.001 | 0.684 | 0.748 |
| pH | 0.286 | 32.163 | 5 | 0.000 | 0.547 | 0.577 |

g.l.: grados de libertad

ción de estos por el valor estimado de e . (Crowder & Hand, 1990). Los estimadores desarrollados por Greenhouse & Geisser (1959) y Huynh & Feldt (1970) aplicados a de la prueba F de cada una de las cuatro variables edáficas se presentan en la Tabla 4.

La alta variabilidad y la falta de homogeneidad de la varianza en las variables estudiadas se debe a que en gran parte el ecosistema se encuentra extremadamente seco, y debido al régimen de inundación del brazo Calancala, asociado con el aumento de los caudales por la precipitación (Maza & Zárate, 2001), se ocasionan cambios significativos en el valores de las variables estudiadas (Martínez-Ramos & Ruiz-Ochoa, 2001; Martínez-Ramos *et al.*, 2003) que influyen en las relaciones de cambio en el tiempo.

Los valores del p-Valor asociados con las fuentes de variación en los contrastes (lineal, cuadrático y cúbico)

permitieron determinar la existencia de las tendencias de cambio a través del tiempo de las cuatro variables estudiadas. Se encontró que un nivel de significancia ($p < 0.005$; Tabla 5) para los contrastes (lineal, cuadrático y cúbico) existe una tendencia de cambio cuadrática y cúbica para salinidad y CE; lineal y cuadrática para MO; y lineal, cuadrática y cúbica para el pH a través de las épocas climáticas (Martínez-Ramos & Ruiz-Ochoa, 2001; Martínez-Ramos, *et al.*, 2003).

Por ser la CE una medida de la cantidad de sales en la solución del suelo (IGAC, 1990), la variación temporal fue similar tanto a la salinidad, con disminución durante el mes de nov/00 (época lluviosa) y aumento en feb/01 (época seca), este comportamiento igual fue señalado por Giraldo & Campos (1997) en la Ciénaga Grande de Santa Marta (en adelante CGSM). El promedio de salinidad fue 7.99 mg L^{-1} y el de CE 13.70 mS cm^{-1} (fig. 2 y 3).

Tabla 4. Corrección de los grados de libertad con los estimadores Greenhouse-Geisser y Huynh-Feldt para las variables salinidad (mg L^{-1}), CE (mS cm^{-1}), MO (%), y pH.

| Variables | | g.l. | Cuadrados medios | F | p-valor |
|-----------|--------------------|-------|------------------|--------|---------|
| Salinidad | Esfericidad | 3 | 220.192 | 32.082 | 0.000 |
| | Greenhouse-Geisser | 1.266 | 521.962 | 32.082 | 0.000 |
| | Huynh-Feldt | 1.299 | 508.424 | 32.082 | 0.000 |
| CE | Esfericidad | 3 | 589.155 | 32.170 | 0.000 |
| | Greenhouse-Geisser | 1.263 | 1399.883 | 32.170 | 0.000 |
| | Huynh-Feldt | 1.296 | 1363.925 | 32.170 | 0.000 |
| MO | Esfericidad | 3 | 130.999 | 11.113 | 0.000 |
| | Greenhouse-Geisser | 2.068 | 189.996 | 11.113 | 0.000 |
| | Huynh-Feldt | 2.243 | 175.226 | 11.113 | 0.000 |
| pH | Esfericidad | 3 | 3.465 | 18.225 | 0.000 |
| | Greenhouse-Geisser | 1.641 | 6.337 | 18.225 | 0.000 |
| | Huynh-Feldt | 1.732 | 6.000 | 18.225 | 0.000 |

g.l.: grados de libertad.

Tabla 5. Significancia de los contrastes. Un p-Valor < 0.05 en los contrastes (lineal, cuadrático y cúbico) para cualquier fuente de variación indica que existe tendencia de cambio en los periodos climáticos.

| Variables | Contrastes | | |
|-----------|------------------|----------------------|------------------|
| | Lineal (p-Valor) | Cuadrático (p-Valor) | Cúbico (p-Valor) |
| Salinidad | 0.657 | 0.007 | 0.000 |
| CE | 0.774 | 0.005 | 0.000 |
| MO | 0.020 | 0.000 | 0.769 |
| pH | 0.000 | 0.000 | 0.003 |

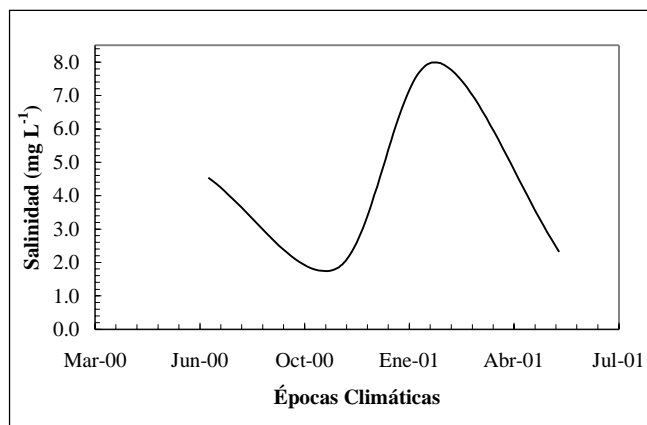


Figura 2. Variaciones de la salinidad (mg L^{-1}) en el brazo Calancala, delta del río Ranchería, entre jul/00 y jun/01.

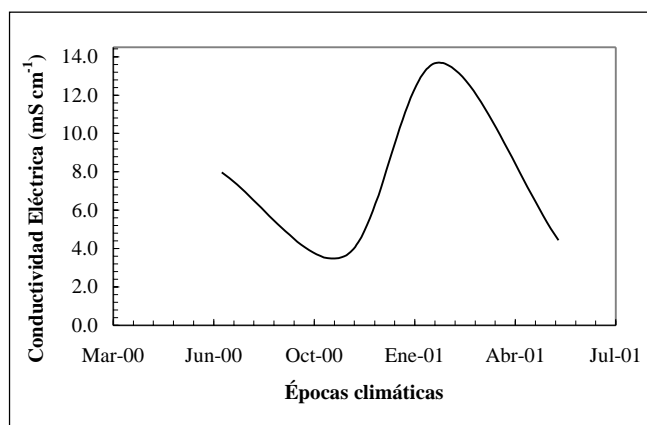


Figura 3. Variaciones de la CE (mS cm^{-1}) en el brazo Calancala, delta del río Ranchería, entre jul/00 y jun/01.

Probablemente estas variaciones se deban al efecto de lavado de las aguas dulces, las mareas ocasionales (Olaya *et al.*, 1991) y al descenso en los niveles de inundación del brazo Calancala (Maza & Zárate, 2001).

El valor máximo promedio de MO estuvo en 10.73% y fue obtenido en nov/00 (Fig. 4) y su tendencia de cambio se asocia con la vegetación y su biota (Jagtap, 1987) y con los aportes de sedimento (Jagtap, 1987; Ellison, 1998). Esto podría estar presentándose en el brazo Calancala donde la presencia de plantas halófitas (*B. maritima*) que representa el sotobosque (Lema, 2000; Lema *et al.*, 2003) y de neumatóforos de *A. germinans* ambos con altura de 60 cm, sirven de trampas al sedimento (Vásquez, 2000), y favorecen su acumulación (Martínez-Ramos & Ruiz-Ochoa, 2001; Martínez-Ramos *et al.* 2003). En general la MO se encontró dentro de

los rangos registrados por Odum *et al.* (1982) entre 10 y 20% para el Sur de La Florida y por Giraldo (1995) entre 1.4 y 60.1% para la CGSM.

En relación con el pH, los mayores valores se presentaron en feb/01 con valor promedio de 7.10 (fig. 5) estando dentro de los rangos registrados por Pannier & Pannier (1985; entre 4.4 – 8.8) para los manglares de Venezuela y por Boto & Wellington (1984; entre 6.02 – 7.00) para los de Australia. El comportamiento del pH probablemente se deba al efecto de las madrigueras que hacen los cangrejos (Hogarth, 1999) y a la abundancia de *A. germinans* a lo largo de las 28 UE (Vásquez, 2000), ya que como lo registran Cintrón & Schaeffer-Novelli (1983) y Pinto-Nolla & Naranjo (1993), los suelos poblados de *Rhizophora mangle* presentan un pH más básico que los de *A. germinans* cuando están saturados de agua, pero al secarse se hacen más ácidos. Aunque en el brazo Calancala,

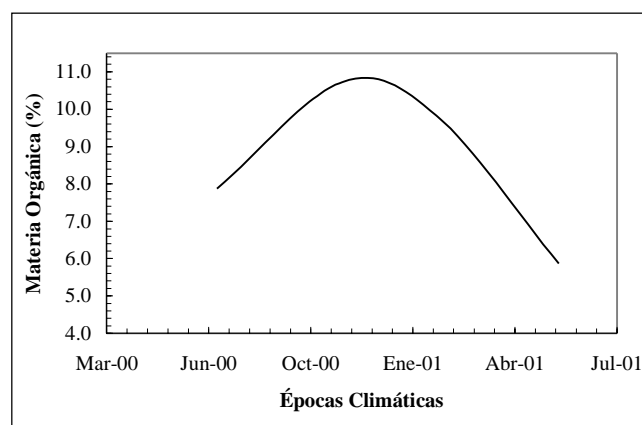


Figura 4. Variaciones de la MO (%) en el brazo Calancala, delta del río Ranchería, entre jul/00 y jun/01.

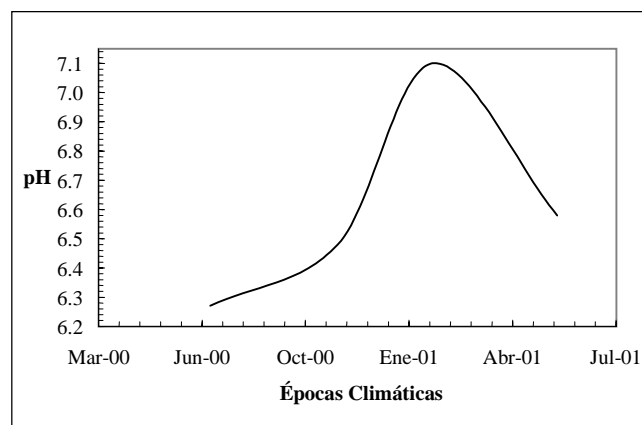


Figura 5. Variaciones del pH en el brazo Calancala, delta del río Ranchería, entre jul/00 y jun/01.

el pH no experimentó cambios drásticos que pudieran llevarlo a la acidez (Martínez-Ramos & Ruiz-Ochoa, 2001).

Para todas las variables estudiadas los máximos valores promedio se encontraron en Feb/01, con excepción de MO, dado en Nov/00, esto posiblemente sea el reflejo de las condiciones climáticas locales.

Conclusiones

El supuesto de esfericidad no se cumplió en las cuatro propiedades edáficas estudiadas, lo que implicó ajustar los grados de libertad.

Se hizo necesario el análisis de varianza de medidas repetidas porque las mediciones fueron realizadas sobre la misma UE en los diferentes periodos climáticos y el principal interés se centró en determinar cambios significativos en el tiempo de las cuatro propiedades edáficas estudiadas en el suelo de manglar del brazo Calanaca.

Se aceptó la hipótesis de existencia de cambios significativos en los promedios de las variables salinidad, CE, MO y pH del suelo en el manglar del brazo Calanaca a través de las épocas climáticas (tiempo).

La escasez de datos tomados en el tiempo no permitió trabajar técnicas como las series de tiempo que exigen un tamaño de muestra mayor; además el interés de este trabajo se centró en la existencia de cambios significativos de las variables estudiadas.

La aplicación de esta técnica en las ciencias del suelo ha sido poco aplicada, por lo que este trabajo se convierte en una aproximación de la utilidad que puede darse desde el punto de vista de entender las tendencias de cambios en el tiempo cuando se trabaja con variables medidas en la misma UE.

Cuando se realiza una ANOVA o un análisis de regresión, o simplemente un análisis gráfico se ignoran informaciones disponibles sobre las tendencias de cambio. Además, como los datos son cronológicos sobre la misma UE, seguramente se estaría violando el supuesto de independencia.

Agradecimientos

Esta investigación hizo parte del proyecto "Estructura, fenología y demografía del manglar del Riíto y el Valle de los Cangrejos, delta del río Ranchería", Cofinanciado por COLCIENCIAS Código 1145-09-648-98; desarrollado conjuntamente por la Universidad Nacional de Colombia Sedes San Andrés y Medellín, la Universidad de La Guajira y CORPOGUAJIRA, con apoyo de IDEAM.

Referencias

- Arias, B. & J. Fuertes. 1999. Competencia social y solución de problemas sociales en niños de educación infantil: un estudio observacional. Universidad de Valladolid. Revista Electrónica del Departamento de Psicología, **1**(1): 1-40.
- Azeka, E.; Franchini, J.; Valler, C. & E. Bocchi. 2002. Delisting of infants and children from the heart transplantation waiting list after carvedilol treatment. Journal of the American College of Cardiology, **40**(11): 2034-2038.
- Benavides, J. & L. López. 1994. Una aplicación de medidas repetidas en psiquiatría. Revista Colombiana de Estadística, **29-30**: 31-44.
- Boto, K. 1984. Waterlogged saline soils. In: Snedaker S. y J. Snedaker (eds.). The mangrove ecosystem: research methods, **7**: 114-130.
- _____ & J. Wellington. 1984. Soil characteristics and nutrient status in Northern Australian mangrove forest. Estuaries, **7**(1): 61-69.
- Box, G. 1954. Some theorems on quadratic forms applied in the study of analysis of variance problems: II effects of inequality of variance and of correlation of errors in two-way classification. Annals of Mathematical Statistics, **25**: 484-498.
- Church, C. & J. Schwenka. 1986. Autoregressive errors with a repeated measures design in clinical trials. Controlled Clinical Trials, **7**: 149-164.
- Cnaan, A.; Laird, N. & P. Slasor. 1997. Using the general linear mixed model to analyze unbalanced repeated measures and longitudinal data. Statistics in Medicine, **16**(20): 2349-2380.
- Crowder, M. & D. Hand. 1990. Analysis of repeated measures. Chapman and Hall. New York. 251 p.
- Dewis J. & F. Freitas. 1984. Métodos físicos y químicos de análisis de suelos y aguas. Boletín de suelos de la FAO, **10**: 7-19.
- Ellison, J. 1998. Impacts of sediment burial of mangroves. Marine Pollution Bulletin, **37**(8-12): 420-426.
- Field, A. 1998. A bluffer's guide to... sphericity. The british psychological society: mathematical, statistical & computing section. Newsletter, **6**:13-22.
- Fox, J. 1984. Lineal statistical models and related methods with applications to social research. John Wiley and Sons, New York. 449 p.
- Gill, J. & H. Hafs. 1971. Analysis of repeated measurements of animals. Journal of Animal Science, **35**: 181-189.
- Giraldo, B. 1995. Regeneración del manglar en el sector occidental (Isla Salamanca -Complejo Pajárales) de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Caribe colombiano. Trabajo de grado. Plan de estudio Biología. Universidad del Valle. Cali. 116 p.
- Giraldo, R. & N. Campos. 1997. Una aplicación del análisis de varianza de medidas repetidas en un experimento con metales pesados. Rev. Acad. Colomb. Cienc., **21**(81): 467-472.
- González, M. 1994. Suelos agrícolas (notas de laboratorio). Taller de publicaciones. Universidad Nacional de Colombia. Palmira. 201 p.

- Greenhouse, S. & S. Geisser.** 1959. On methods in the analysis of profile data. *Psychometrika*, **32**(3): 95-112.
- Grimshaw, H.** 1989. Analysis of soils. In: Stewart E. Allen (ed.). *Chemical analysis of ecological materials*. Blackwell Scientific Publications 2nd edition. London.
- Gurevich, J. & S. Chester.** 1986. Analysis of repeated measures experiments. *Ecology*, **67**(1): 251-255.
- Guthrie, D.** 1981. Analysis of dichotomous variable in repeated measures experiments. *Psychological Bulletin*, **90**: 189-195.
- Hogarth, P.** 1999. *The biology of mangroves*. Oxford University Press. New York. 227 p.
- Huynh, H. & L. Feldt.** 1970. Estimation of the box correction for degrees of freedom from sample data in the randomized block and split plot designs. *Journal of Educational Statistics*, **1**: 69-82.
- ICONTEC.** 1983. Ingeniería civil y arquitectura. Suelos. Determinación de humedad, cenizas y materia orgánica. NTC 1886. Santafé de Bogotá. 5 p.
- IDEAM.** 1997. Sección de meteorología sinóptica aeronáutica. Datos diarios, área mensajes climáticos. Estación Almirante Padilla, Riohacha La Guajira. Mimeografiado.
- IGAC.** 1979. Propiedades químicas de los suelos. Subdirección agrológica. Segunda edición. Bogotá. 321 p.
- . 1988. Estudio semidetallado y general de suelos del municipio de Riohacha. Subdirección agrológica. Bogotá. 215 p.
- . 1990. Propiedades físicas de los suelos. Subdirección agrológica. Segunda edición. Bogotá. 813 p.
- Jagtap, T.** 1987. Seasonal distribution of organic matter in mangrove environment of Goa. *Indian Journal of Marine Sciences*, **16**: 103-106.
- Jimerson, T. & L. Bond.** 2001. Mothers' epistemologies, turn-taking, and contingent interaction with preschoolers. *Applied Developmental Psychology*, **22**: 379-396.
- Keselman, H. & J. Keselman.** 1984. The analysis of repeated measures designs in medical research. *Statistics in Medicine*, **3**: 185-195.
- Kirk, R.** 1982. *Experimental design: Procedures for the behavioral sciences*. 2nd edition. Brooks Cole Publishing Company. California. 911 p.
- Lema, L.** 2000. Dispersión y reclutamiento de especies de mangle en el delta del río Ranchería. Trabajo de grado. Facultad de ciencias agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 65 p.
- ; **Polanía, J. & L. Urrego.** 2003. Dispersión y establecimiento de las especies de mangle del río Ranchería en el periodo de máxima fructificación. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **27**(102): 93-103.
- Maple, J.; Vig, K.; Beck, F.; Larsen, P. & S. Shanker.** 2005. A comparison of providers' and consumers' perceptions of facial-profile attractiveness. *Am. J. Orthod. Dentofacial. Orthop.*, **128**: 690-696.
- Martínez-Ramos, L. & M. Ruiz-Ochoa.** 2001. Caracterización de algunas propiedades físicas y químicas del suelo manglarico en el Valle de los Cangrejos (brazo Calancala), Riohacha. Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería. Universidad de La Guajira. Riohacha. 72 p.
- ; ———; **Castellanos, M. & J. Polanía.** 2003. Algunas propiedades edafológicas del manglar del brazo Calancala, río Ranchería, Riohacha. *Revista Suelos Ecuatoriales*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, **33**(1): 66-76.
- Mauchly, J.** 1940. Significance test of sphericity of a normal *n*-variate distribution. *Annals of Mathematical Statistics*, **29**: 204-209.
- Maxwell, S. & H. Delaney.** 2004. *Designing experiments and analyzing data: a model comparison perspective* 2nd edition. Mahwah, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates. 1104 p.
- Maza, E. & Y. Zárate.** 2001. Hidroclimatología en el delta del río Ranchería; posibles efectos sobre la estructura del manglar en el Riño y Valle de los Cangrejos, Caribe colombiano. Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería. Universidad de La Guajira. Riohacha. 124 p.
- Montgomery, D.** 1991. *Diseño y análisis de experimentos*. Grupo Editorial Iberoamérica. México D.F. 589 p.
- Moreno, W.** 1993. Aplicaciones al diseño y análisis de experimentos. Ediciones Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 330 p.
- Moser, E.; Saxton, A. & S. Pezeshki.** 1990. Repeated measures analysis of variance: application to tree research. *Can. J. For. Res.*, **20**: 524-535.
- Muraro, P.; Liberati, L.; Bonanni, L.; Pantalone, A.; Caporale, C.; Iarlori, C.; De Luca, G.; Farina, D.; Lugaresi, A. & D. Gambi.** 2004. Decreased integrin gene expression in patients with MS responding to interferon- β treatment. *Journal of Neuroimmunology*, **150**: 123-131.
- Nagarseker, B. & K. Pillai.** 1973. The distribution of the sphericity test criterion. *Journal of Multivariate Analysis*, **3**: 226-235.
- Odum, W.; McIvor, C. & T. Smith.** 1982. *The ecology of the mangroves of South Florida: a community profile*. Department of Environmental Sciences. University of Virginia. 142 p.
- Olaya, H.; Centenaro, D.; Leguizamo, I. & F. Pineda.** 1991. Los bosques de mangle en el antiguo delta del río Sinú (Córdoba-Colombia). Universidad de Córdoba, ICFES, CVS. Forestales FVE Ltda. Montería. 30 p.
- Otero W.; Gutiérrez, O.; Quintero, F.; Orozco, C. & M. Ibáñez.** 2000. Eficacia de pantoprazol, combinado con claritromicina y amoxicilina, para la erradicación de *Helicobacter pylori* en pacientes con úlcera duodenal o dispepsia no ulcerosa. *Revista Colombiana Gastroenterol.* **15**: 247-251.
- Pannier, F. & R. Pannier.** 1985. La vegetación de manglares de la cuenca del Lago de Maracaibo. *Memoria Sociedad Venezolana de Ciencias Naturales*, **60** (143): 327-346.
- Sánchez-Páez, H.; Álvarez-León, R.; Pinto-Nolla, F.; Sánchez-Alfárez, A.; Pino-Rengijo, J.; García-Hansen I. & M. Acosta-Peñaloza.** 1997. Diagnóstico y zonificación preliminar de los manglares del Caribe de Colombia. Ministerio del Medio Ambiente/OIMT. Santafé de Bogotá. 511 p.

- SPSS.** 1999. SPSS 9.0. Manual de usuario. Chicago, IL: SPSS Inc.
- Steel, R. & J. Torrie.** 1988. Bioestadística principios y procedimientos. Segunda edición. Mc Graw Hill. México. 622 p.
- Stip, E.; Ali-Sepetry, A.; Prouteau, A.; Briand, C.; Nicole, L.; Lalonde, P. & A. Lesage.** 2005. Cognitive discernible factors between schizophrenia and schizoaffective disorder. *Brain and Cognition*, **59**: 292-295.
- Underwood, A.** 1981. Techniques of analysis of variance in experimental marine biology and ecology. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, **19**: 513-605.
- United States Department of Agriculture (USDA) y Natural Resources Conservation Service (NRCS).** 1998. Keys to Soil Taxonomy. 8th edition. Soil Survey Staff.
- Vásquez, J.** 2000. Estudio y análisis estructural de dos bosques de mangle en el Valle de los Cangrejos y el Riño, departamento de La Guajira. Trabajo de grado. Facultad de ciencias agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 75 p.
- Vilela, M.; Simeão, R. & Y. Cunha.** 2000. Blup individual com medidas repetidas aplicado ao melhoramento de espécies perenes. *Cienc. Agrotec. Lavras.*, **24**(4): 986-997.
- von Ende, C.** 1993. Repeated-measures analysis: growth and other time dependent measures. In: Scheiner, S. and I. Gurevitch (eds.). *The design and analysis of ecological experiments.* Chapman and Hall. p. 113-137.
- Wallewnstein, S. & A. Fisher.** 1997. The analysis of the two-period repeated measurements crossover design with applications to clinical trials. *Biometrics*, **33**: 261-269.
- Weinfurt, K.** 2000. Repeated measures analyses: ANOVA, MANOVA, and HLM. In: Grimm LG, Yarnold P. R. (eds.). *Reading and understanding more multivariate statistics.* American Psychological Association. p. 317-363.

Recibido el 14 de marzo de 2006.

Aceptado para su publicación el 10 de abril de 2006.

ALTERACIÓN FÍSICA DE LOS FRAGMENTOS DE MATRIZ Y DE LOS VIDRIOS VOLCÁNICOS

por

Flórez M. M.T.¹, L.N. Parra S.² & D. Malagón³

Resumen

M.T. Flórez M., L.N. Parra S. & D. Malagón. Alteración física de los fragmentos de matriz y de los vidrios volcánicos. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **30** (115): 243-258. 2006. ISSN 0370-3908.

Los diferentes componentes de las cenizas volcánicas no tienen igual susceptibilidad a meteorizarse, ello lo evidencian los resultados obtenidos en esta investigación, donde se tomaron tres de estos componentes: fragmentos de matriz, vidrios volcánicos coloreados y vidrios volcánicos incoloros los cuales, luego de haber estado sometidos a disolución durante dos años en ácido húmico, en agua acidulada y en ácido oxálico, permiten mostrar que, de ellos, son los fragmentos de matriz los que presentan mayor superficie específica, mayor superficie de reacción, mayor número de rasgos de alteración superficial y son los que producen mayores cantidades de iones de Al^{3+} , Si^{4+} y Fe^{3+} , por ello, son los más susceptibles de ser meteorizados.

Palabras clave: Cenizas volcánicas, fragmentos de matriz, vidrio volcánico, meteorización, alteración, Departamentos de Caldas y Antioquia, Colombia.

Abstract

Different components of the volcanic ashes do not have the same susceptibility to weathering. During this investigation, matrix fragments, colored and colorless volcanic glass shards components were subjected to experimental weathering during almost two years in humic acid, acidulated water and oxalic acid. The matrix fragments were the most susceptible of being weathering because they presented at the final of the experimental cycle larger specific and reaction surfaces, more features of superficial alteration and they release greater quantities of Al^{3+} , Si^{4+} and Fe^{3+} ions.

Key words: Volcanic ashes, matrix fragments, glass shards, weathering, alteration, Departaments of Caldas and Antioquia, Colombia.

¹ Ingeniera Geóloga, MSc., Geomorfología y Suelos. Ph D., Suelos y Aguas. Docente Investigador Universidad de Antioquia, Centro de Investigaciones Ambientales, Facultad de Ingeniería. Correo electrónico: mtflorez@udea.edu.co.

² Ingeniero Geólogo, MSc., Ciencia y Técnica del Carbón, Ph D., Biología. Docente Investigador Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Escuela de Geociencias. Correo electrónico: lnparra@unalmed.edu.co

³ Ingeniero Agrónomo. Ph D. Correo electrónico: dimas3210@yahoo.es

Introducción

Estudiar en el laboratorio la meteorización física y química de los fragmentos de matriz y de los vidrios volcánicos pertenecientes a la zona Norte de la Cordillera Central colombiana es el objetivo central de esta investigación. Para ello se elaboró un “Diseño experimental completamente al azar de efectos fijos y de arreglo factorial 3²” que tiene dos factores con tres niveles cada uno, así: Materiales (vidrio volcánico coloreado (VVC), vidrio volcánico incoloro (VVI) y fragmentos de matriz (FM)) y Reactivos (ácido húmico (AH), ácido oxálico (AO) y agua acidulada (AA)). La solubilidad de los FM, de los VVC y de los VVI, se evalúa a través de la medida de dos variables maestras: pH, conductividad eléctrica (CE) y tres variables de control: aluminio (Al), silicio (Si) y hierro (Fe) que se constituyen en las variables respuestas.

Dentro de los resultados más relevantes de esta investigación se destaca el hecho de que son los FM los que presentan mayor superficie específica, mayor superficie de reacción, mayor número de rasgos de alteración superficial y son los que producen mayores cantidades de iones de Al^{3+} , Si^{4+} y Fe^{3+} , (en un 72%), son por ello, los más susceptibles de ser meteorizados; siguen a estos los VVC (en un 23%) y luego los VVI (en un 5%).

Marco teórico

Los volcanes constituyen el único medio que pone en comunicación directa la superficie de la tierra con los niveles profundos de la corteza terrestre permitiendo la observación y el estudio de los materiales líticos de origen magmático, que constituyen aproximadamente el 80% de la corteza sólida. Los materiales que arrojan los volcanes durante las erupciones pueden ser de tres clases: gases, líquidos y sólidos. Los gases son productos que emiten los volcanes, a veces con extraordinaria violencia; son mezclas complejas cuya composición varía de unos a otros, por las distintas erupciones, e incluso por los distintos períodos de una misma erupción. Cuando la temperatura es muy elevada, (500~1.200°C) los componentes principales son: HCl, SO₃, CO₂, H₂, H₂S, HF y N₂. Cuando la temperatura varía ente 100 y 500°C predominan SO₂, H₂S, CO₂, N₂ y H₂, mientras que a temperaturas por debajo de los 60°C los principales componentes son CO₂ y H₂O_(v), en este caso, algunos autores creen que se origina a partir del metamorfismo de rocas carbonatadas. Otros componentes como el NH₃, F₂, Hg, etc., son de dudoso origen primario.

Los componentes líquidos de los volcanes son el magma fundido que recibe el nombre general de lavas, son ri-

cas en gases y fluyen por el cráter y se derraman sobre las laderas del volcán formando corrientes o coladas. El flujo de las lavas depende de su composición, temperatura, viscosidad y volumen, así como de la topografía, la cual condiciona la dirección de la colada. Estos componentes líquidos son llamados piroclastos (piros: fuego; clastos: fragmentos), son fragmentos y partículas de proyección aérea que reciben el nombre genérico de tefra o tephra: este término se reserva para designar los depósitos donde los piroclastos se encuentran sueltos; cuando las tefras están soldadas, reciben el nombre de tobas. La variedad de formas y medidas es enorme si se considera que, en su fase explosiva, una erupción de tipo medio arroja miles de metros cúbicos por segundo, de estos fragmentos.

Las tefras pueden clasificarse por su tamaño y por la forma como se depositan. Por su tamaño, **Turner & Verhogen** (1978) los clasifican como: 1. Bombas; 2. Bloques; 3. Escorias; 4. Pumita o pómez; 5. Lapilli y 6. Cenizas.

Por la forma como se depositan las tefras, **Fritsch & Reiss** (1867), citados por **Araña & Ruiz** (1974), los clasifican en campo como: 1. Cinder; 2. Tobs y tobas soldadas y, 3. Ignimbritas, en éstos últimos depósitos, se destacan en los aspectos estructurales y texturales, la presencia de fragmentos de rocas y pómez, así como de vidrio (“shards”). Las pequeñas esquivras vítreas se distinguen normalmente de la matriz envolvente por un grado de cristalización y desvitrificación diferentes y, por su menor oxidación, hecho que le confiere a los vidrios un índice de refracción y color diferentes. La mayoría de los autores interpretan estos fragmentos de vidrio como restos de las paredes o septos de burbujas de gases liberados durante la emisión.

Los fragmentos de pómez igualmente englobados dentro de la matriz de la ignimbrita suelen aparecer estirados y, a veces, su aplastamiento produce un vetado típico —piel de serpiente— o un bandeado alternante en el que las bandas correspondientes a la matriz suelen ser más anchas y claras. El aplastamiento de los fragmentos de pómez y de los shards se debe en parte a la presión de carga, pero existe un estiramiento pronunciado cuya dirección coincide con la del movimiento del material y que se debe a la fluidez del mismo. El término “ffames”, hace referencia al aplastamiento y estiramiento de estos fragmentos vítreos o de pómez, aún plásticos, durante el flujo laminar. Las texturas de flujo laminar se reflejan también en la disposición paralela de los fenocristales, cuya dimensión máxima coincide con la dirección del movimiento.

Componentes mineralógicos de las cenizas volcánicas: se diferencia tres tipos de componentes de las ceni-

zas volcánicas, los cuales distingue con base en los parámetros como el tamaño y la composición, estos son: cristales, líticos o fragmentos vítreos densos y pumitas que incluyen esquiras de vidrio.

Spark et al., (1977), señalan que las cenizas volcánicas están compuestas de minerales, fragmentos de roca y esquiras de vidrio. Algunos minerales se encuentran recubiertos por vidrio y su proporción con respecto al mineral es el resultado de la fragmentación magmática. Para **Fisher & Schmincke** (1984), las cenizas volcánicas están compuestas de materiales vítreos, fenocristales y partículas líticas. Los materiales vítreos consisten esencialmente en esquiras de vidrio volcánico con o sin vesículas, incoloros (ácidos) o coloreados (básicos).

Los fenocristales consisten en minerales pirogénicos, la mayoría de ellos euhedrales y pueden o no estar recubiertos por vidrio volcánico comagmático; éstos incluyen cuarzo bipiramidal, biotita, plagioclasa y feldespato-K (sanidina), olivino, piroxenos y anfíboles. Las partículas líticas pueden ser juveniles, cognatas o accidentales. **Heiken & Wohletz** (1985), plantean que las cenizas volcánicas constan de tres componentes: fragmentos de minerales, esquiras de vidrio (granos de pumita) y fragmentos líticos accidentales. Los fragmentos de minerales son cristales precipitados del magma original líquido antes de la erupción, la variedad de éstos provee información acerca de la composición del magma. Las esquiras de vidrio son esquiras solidificadas del magma cuya densidad y porcentaje de vesículas o burbujas son utilizadas para estimar indirectamente la cantidad de gas presente. Los fragmentos líticos accidentales ayudan a entender el tipo de rocas presentes en el conducto y en el sistema volcánico.

Shoji, Nanzyo & Dahlgren (1993), caracterizan y clasifican a las cenizas volcánicas con base en la composición mineralógica y química. Desde el punto de vista mineralógico, diferencian dos categorías: Minerales claros cuya gravedad específica es $<2.8-3.0$ y minerales oscuros cuya gravedad específica es $>2.8-3.0$. Los minerales claros son esencialmente vidrio volcánico incoloro \gg feldespatos y plagioclasas \gg silicatos (cuarzo, cristobalita y tridimita) $>$ mica. La distribución de plagioclasa y feldespato alcalino depende de la composición química del magma. Los minerales oscuros son esencialmente hiperstena $>$ minerales opacos $>$ augita $>$ hornblenda.

La ocurrencia de otros minerales esta relacionada con las zonas volcánicas. Señalan que las cenizas volcánicas están dominadas por vidrio volcánico que presenta una baja resistencia a la meteorización química y es un cons-

tituyente de gran importancia como material parental para los suelos ándicos. En las cenizas pueden encontrarse vidrios incoloros y coloreados y estos últimos, son más susceptibles a meteorizarse. Desde el punto de vista químico clasifican a las cenizas volcánicas dentro de alguna de los cinco tipos de rocas volcánicas, agrupadas con base en el contenido de sílice total, como: riolitas, dacitas, andesitas, andesita-basáltica y basalto. En cuanto al tamaño de partículas, indican que los minerales cristalinos son más comunes en un rango de tamaño entre 0.1-0.15 mm. La plagioclasa muestra una distribución uniforme en las fracciones arenas y limos. Los vidrios volcánicos se incrementan en una relativa proporción con respecto a la plagioclasa y a los minerales pesados a medida que el tamaño de las partículas decrece.

El **Igac** (1991), separa en las cenizas volcánicas de Colombia, tres fracciones: arena (0.053-0.25mm), limo (<0.053 mm) y arcillas ($<<0.05$ mm), las cuales varían en composición. La fracción arena esta constituida por feldespatos (40-50%), cuarzo (7%), vidrio volcánico incoloro (15%) y coloreado (2%, dependiendo de la región), anfíboles (10%), piroxenos (5-10%), micas, hematitas, goetitas, fitolitos, fragmentos líticos, fragmentos de tobas y pumitas y minerales alterados no identificables. En la fracción limo registra la presencia de cuarzo, cristobalita, anfíboles y plagioclasas como materiales primarios dominantes y en la fracción arcilla, alófana, imogolita, haloisita, caolinita y gibsitita, estas últimas en menor proporción.

En la **Key Soil Taxonomy** (Usda, 1998), se define el material parental de los Andisoles como aquel que está constituido por partículas con diámetro <2 mm y en él se incluyen cenizas, pumitas, cinders y otras eyecciones volcánicas. Dichos suelos pueden contener porcentajes de vidrio entre 5% y 30%.

Para **Flórez** (2000), las cenizas volcánicas pueden ser caracterizadas desde varios puntos de vista: 1. composición química de los componentes, 2. tamaño de los componentes y, 3. composición de los componentes.

1. *Desde la composición química de los componentes:* El contenido de SiO_2 , esencialmente, permite agrupar a las cenizas volcánicas en tres categorías: a. ácidas, cuando el contenido de SiO_2 es mayor del 62%, b. intermedias, cuando el contenido de SiO_2 varía entre 54-62% y, c. básicas, cuando el contenido de SiO_2 es menor del 54%. El primer grupo, de acuerdo con el tipo de magma, es considerado riolítico-dacítico, pertenecientes a la serie toleítica y se caracteriza por la dominancia de minerales. El segundo grupo, se forma con un magma andesítico y basaltito-andesítico, pertene-

ciente a la serie calcoalcalina y se caracteriza por la dominancia de minerales félsicos y máficos en proporciones ligeramente similares. El tercer grupo, procede de un magma basáltico, perteneciente a la serie alcalina y está constituido por minerales máficos del tipo de los ferromagnesianos, en una gran proporción.

2. *Desde el punto de vista del tamaño de los componentes:* Clasifica a las cenizas volcánicas como finas con diámetros entre 0.062-0.25mm, medias con diámetros entre 0.25-0.5 mm y gruesas con diámetros entre 0.5-2.0 mm. Relaciona estos tamaños con la cantidad y la distancia del depósito a la fuente. A medida que disminuye el tamaño de la ceniza y aumenta la distancia a la fuente, aumenta la proporción de los fenocristales, los fragmentos de matriz y los vidrios volcánicos. Los tamaños más gruesos se localizan en cercanías a la fuente volcánica y en ellos son comunes los fragmentos líticos y los fenocristales gruesos.
3. *Desde el punto de vista de sus componentes:* Reporta que las cenizas volcánicas están constituidas por: fragmentos líticos, fragmentos de matriz, vidrio volcánico y fenocristales. Los porcentajes relativos de estos componentes en cada capa de ceniza volcánica varían dependiendo de: a. composición química, b. tamaño del material y, c. distancia del depósito a la fuente. En ese sentido una descripción de estos componentes es la siguiente:

Los fenocristales (F): Comprende todos los minerales cristalinos presentes en la ceniza volcánica, su contenido es más alto en tefras andesíticas y más bajo en tefras ríolitas y basálticas. La composición de los fenocristales puede dividirse en dos categorías: minerales primarios livianos (g.e.<2.8-3.0) y minerales primarios pesados (g.e.>2.8-3.0). Los minerales primarios livianos predominan en las tefras con un rango de abundancia entre 70 y 95%. Dentro de la categoría de minerales livianos, en cuanto a abundancia, están: feldespato/plagioclasa > silicatos > mica. De las plagioclasas, la andesina ($Ab_{70}An_{30}$ - $Ab_{50}An_{50}$) y labradorita ($Ab_{50}An_{50}$ - $Ab_{30}An_{70}$) son las más comunes. Los minerales pesados son sólo una pequeña fracción de las cenizas volcánicas, con una composición química félsica e intermedia. La abundancia mineral relativa de los minerales pesados de las tefras es: hipersteno > minerales opacos > augita > hornblenda. La ocurrencia de otros minerales ferromagnesianos depende de la fuente de magma del volcán.

Los fragmentos líticos (FL): Son fragmentos de roca de tipo accesorio, que se encuentran mezclados con la ceniza volcánica, pueden ser fragmentos de rocas

hipabisales y volcánicas consolidadas, derivadas de los mismos conos eruptivos; otros fragmentos líticos pueden ser accidentales, derivados de los basamentos subvolcánicos y éstos pueden consistir en cualquier clase de roca, ya sean accesorios o accidentales; muchas eyecciones líticas exhiben los efectos del metamorfismo de contacto. Muchos de ellos pueden ser parcialmente vitrificados antes de la erupción.

Los fragmentos de matriz (FM): Representan una parte del sistema magmático que fue rápidamente enfriado, razón por la cual se producen numerosos sitios de nucleación de cristales que estuvieron limitados por el tamaño de este y produjeron numerosos microlitos y crisolitos (Figuras 1a y 1b). Los FM son el resultado de la cristalización continua bajo presión uniforme, algunos llegan a ser esencialmente vítreos y exhiben diminutas grietas incurvadas, a veces concéntricas, debidas a la contracción del vidrio durante el enfriamiento, dando lugar a una estructura perlítica. Algunos FM se caracterizan por una estructura vesicular, expresión referida a la matriz con burbujas atrapadas, las que pueden ser en forma de almendra, redondeadas, elipsoidales o, aún, tabulares, muchas veces pueden estar alineadas debido al movimiento o corriente que tiene lugar en la lava aún líquida. A nivel de forma los FM no siguen ningún patrón particular, son amorfos, algunos bordes son angulosos, ligeramente curvos o localmente aplanados; como fragmentos pueden ser láminas o sólidos gruesos de varios nm de espesor.

Los Vidrios Volcánicos: Pueden ser vidrios volcánicos coloreados o vidrios volcánicos incoloros.

Los Vidrios Volcánicos Coloreados (VVC): Son cuerpos sólidos, láminas delgadas de escaso espesor o esquirlas vítreas, con formas irregulares, bordes redondeados o angulosos y con fractura concoidea, curva o planar; con o sin grietas, canales o particiones irregulares. Las superficies son irregulares y normalmente presentan adherencias del mismo material. A veces se hacen evidentes las texturas fluidales y las inclusiones de otros minerales bien desarrollados, como zeolitas, que puede intercrecer en las vesículas de las cuales adquiere su forma redondeada. Son de color pardo y baja transparencia, en general, irregulares. Algunos presentan anisotropía, localizada en los bordes o en sitios en donde se ubican las inclusiones; generalmente no las poseen, pero cuando las tienen, éstas son de minerales opacos y, en forma menos usual, inclusiones fluidas. Ocasionalmente presentan en sus superficies adherencias de un material arcilloso pardo u oscuro que le da al vidrio un aspecto pulverulento. Muchas veces este recubrimiento es dominante y llega a invadir totalmente el grano impidiendo su identificación. Pueden ser clasificados como:

1. Pardos con superficies lisas;
2. Pardos con superficies lisas y con inclusiones magnéticas y,
3. Pardos con superficies lisas e inclusiones de minerales o fluidas, Figuras 1c y 1d.

Los Vidrios Volcánicos Incoloros (VVI): Son silicatos hidratados que tienen una estructura caracterizada por uniones tetrahedrales débiles de silicio con espacios intermoleculares (Fisher & Schmincke, 1984). Este se descompone más rápidamente que las fases minerales asociadas y es un componente importante de la tefra. Flórez & Parra (1992) los agrupan con base en su morfología, tamaño y el índice de refracción en dos grupos:

1er. Grupo: Vidrios Escoriáceos: Poseen abundantes vesículas en forma de cavidades largas finas, ovoides o esféricas, altamente elongadas y cilíndricas. Son hialinos, incoloros, ocasionalmente teñidos por óxidos de hierro, irregulares, algunos curvos y con lados cóncavos, generalmente presentan bordes angulosos, escasamente redondeados. Las vesículas que son elongadas y generalmente paralelas a la mayor longitud del vidrio, pueden presentar pseudo orientación indicando, posiblemente, líneas de flujo o estructura fluidal; algunas tienen paredes lisas y en ellas pueden verse pequeñas partículas y/o minerales; son también comunes las vesículas curvoplanares y alargadas que dan al vidrio un aspecto esquelético (Figuras 1e y 1f). Estos vidrios vesiculados se pueden subdividir en:

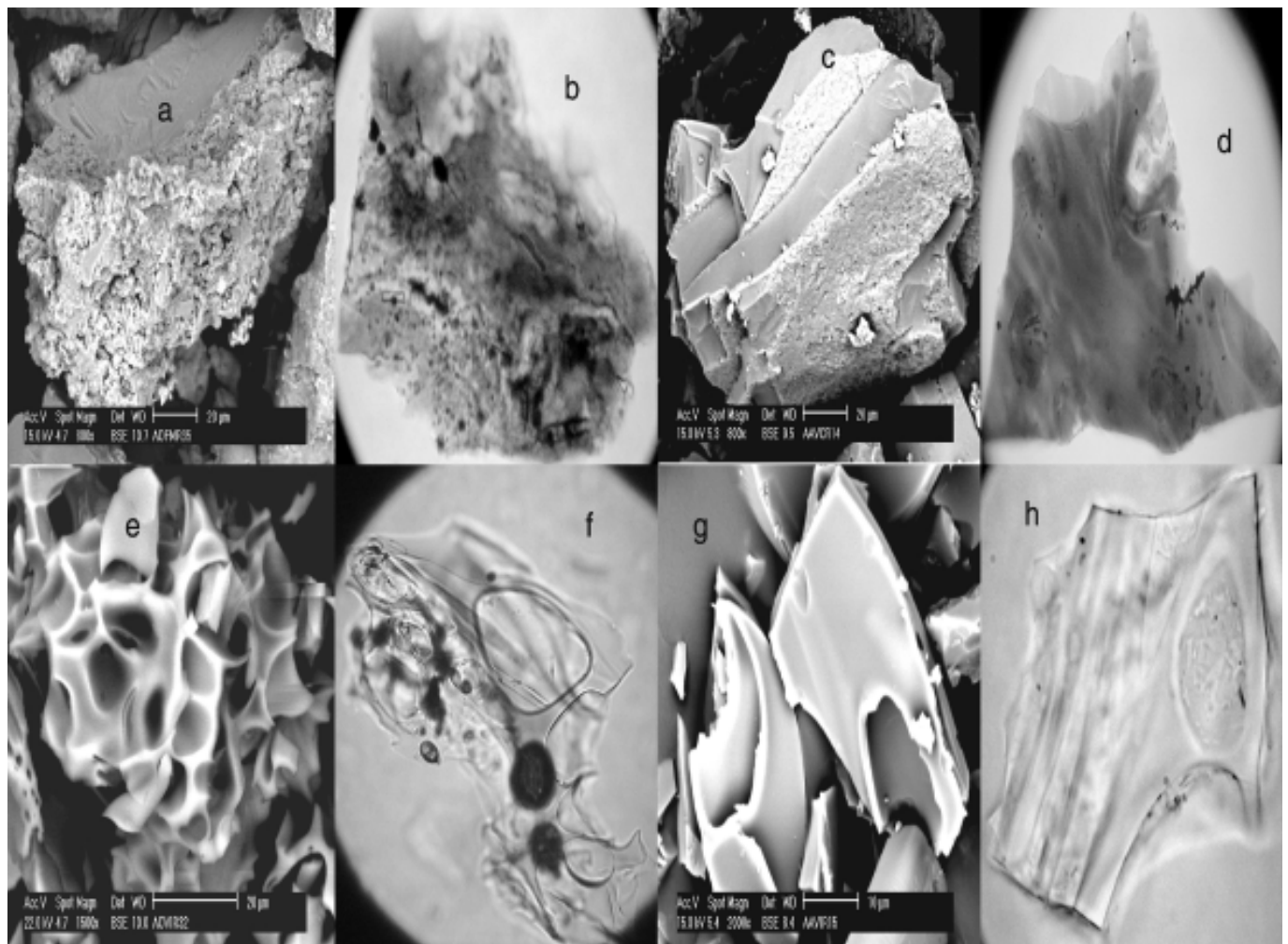


Figura 1. Materiales volcánicos: **a y b:** FM en microscopía electrónica y óptica respectivamente, **c y d:** VVC en microscopía electrónica y óptica respectivamente, **e y f:** VVI escoriáceos en microscopía electrónica y óptica respectivamente y, **g y h:** VVI no escoriáceos en microscopía electrónica y óptica respectivamente.

1. Incoloros con abundantes vesículas esféricas y ovaladas sin inclusiones;
2. Incoloros, con abundantes vesículas e inclusiones de minerales;
3. Incoloros con abundantes vesículas e inclusiones fluidas;
4. Incoloros con abundantes vesículas, inclusiones fluidas e inclusiones de minerales;
5. Incoloros de aspecto lechoso, hidratados, con abundantes vesículas redondeadas y ovaladas. Algunos vidrios tienen inclusiones de minerales y fluidas y pueden o no tener recubrimientos y/o películas de óxidos e hidróxidos de Fe y Mn.

2do. Grupo: Vidrios No Escoriáceos: Son vidrios hialinos e incoloros en forma de placas planas, con bordes subangulares a redondeados, ocasionalmente angulosos y con superficies lisas; cuando se separan por magnetismo en isodinámico, se retienen en la fracción magnética; cuando la separación se lleva a cabo por densidad utilizando bromoformo, integran la fracción pesada. Ocasionalmente tienen recubrimientos o adherencias de un material pardo rojizo o negro, posiblemente películas de óxidos y/o hidróxidos de Fe y Mn, igualmente, inclusiones de minerales y fluidas (Figuras 1g y 1h). Pueden ser: 1. Incoloros con superficies lisas y con inclusiones de minerales y, 2. Incoloros con superficies lisas e inclusiones férricas y/o magnéticas.

El tipo y composición de la ceniza volcánica que se encuentra en Colombia ha sido estudiada por varios investigadores, entre ellos, se destacan los trabajos de **Silva** (1953), quien señala la presencia de vidrio volcánico; los de **Luna** (1963), que estudia la mineralogía de algunos Andosoles del departamento de Antioquia y los correlaciona con muestras del Japón, Nueva Zelandia y Chile, concluyendo que la ceniza volcánica es de tipo dacítico-andesítico, con abundante vidrio; los estudios de **Hermelin** (1980), hacen énfasis en la mineralogía, la cual está dominada por vidrio incoloro, ferromagnesianos, biotita, cuarzo y feldespato.

Estado del arte

Investigadores como **Walker** (1971); **Besoain**, 1972; **Wada**, 1977; **Spark et al.**, (1977); **Fisher & Schmincke** (1984); **Heiken & Wohletz** (1985); **Igac** (1991); **Shoji et al.**, (1993) y **Shoji, Nanzyo & Dahlgren** (1993), entre otros, coinciden en que las cenizas volcánicas están constituidas por vidrios volcánicos (VV), fragmentos líticos

(FL) y fenocristales (F), ninguno de estos autores define explícitamente los fragmentos de matriz (FM) como parte de estos componentes; sin embargo, **Flórez & Parra** (1991), **Flórez** (2000) y (2004), los describen y los nombran como tales y asimilándolos a lo que **Fisher & Schmincke** (1984) llaman líticos cognatos o a lo que en otros estudios mineralógicos en Andisoles, llaman “agregados” de óxidos e hidróxidos de Fe y Al.

Estos autores señalan que en los Andisoles estudiados en la parte norte de la Cordillera Central de Colombia, los vidrios volcánicos no presentan rasgos o marcas de meteorización o alteración que permitan evidenciar sean los precursores de los mbgc, por lo menos, no en el grado que otros investigadores lo han resaltado. Indican que en cenizas frescas o en suelos derivados de ceniza volcánica muy jóvenes, los FM se reconocen por su aspecto “lechoso”, “isotrópico” y por la presencia de microlitos y cristalitos englobados en una matriz vítrea y que cuando estos son sometidos a una fuerte limpieza con ácido fluorhídrico se liberan de los recubrimientos y aparecen las formas lechosas e isotropitas; concluyen que el recubrimiento por óxidos de Fe y/o Mn impide su clasificación mineralógica. Los FM una vez caen al suelo empiezan su proceso de alteración que continúa hasta fases muy lejanas de la pedogénesis; sin embargo, llega un momento en el cual la producción de iones (principalmente de Al, Si y Fe) llega a ser más alta que la que el mismo sistema suelo puede asimilar; entonces estos iones se acumulan en las superficies de los FM hasta invadir el suelo e inactivan en el proceso de alteración.

En la mayoría de las investigaciones y estudios realizados sobre cenizas volcánicas solo se registran como componentes de éstas, los minerales, el vidrio y los fragmentos líticos; en cuanto a éstos últimos, sólo **Fisher & Schmincke** (1984), establecen diferencias importantes que luego **Flórez & Parra** (1992) precisan en cuanto a la existencia de FM y FL propiamente dichos. El VV es precursor de los materiales de bajo grado de cristalinidad (mbgc) (**Shoji et al.**, 1993). En esta investigación se plantea que ni es el único, ni es el precursor principal. En tal sentido tiene importancia investigar cual es la reactividad de estos materiales (FM y VV) y dar luces sobre cuál es el que más se disuelve y en forma más rápida y, por lo tanto participa más activamente en la formación de mbgc, sobre los cuales se fundamenta en gran parte la andolización.

Materiales y métodos

Los VVI se extrajeron de una pumita que hace parte de un depósito piroclástico localizado en las laderas del vol-

cán Cerro Bravo, cerca de la ciudad de Manizales en el departamento de Caldas. Los VVC se extrajeron de una ignimbrita que hace parte de la Formación Combia, localizada la margen derecha de la carretera que de Bolombolo conduce a Ciudad Bolívar en el suroeste del Departamento de Antioquia y los FM se extrajeron tanto de la pumita como de la ignimbrita. Los VVC obtenidos de la ignimbrita, representan una fusión de piroclastos, lo que significa que es lo que se obtendría si se cogiesen todos los componentes de un piroclasto y se fundieran (fiame: fusión de un volumen de piroclastos que luego se enfrían rápidamente). Los VVI obtenidos de la pumita representan una escoria de una lava, y los fragmentos de matriz son como la parte recrystalizada de un magma. La razón por la cual se extrajeron los FM y los VV de estas rocas y no de los suelos se debe a que se pensó realizar el experimento con materiales que no hubiesen estado sometidos a procesos de alteración y/o pedogénesis previos.

Tales procesos dejan marcas de alteración que pueden ocasionar confusión sobre el efecto de los reactivos (AH, AA y AO) en estos minerales y dificultan evaluar correctamente el proceso de disolución ocurrido en ellos. Con los materiales frescos es posible identificar física y químicamente la acción de las soluciones sobre ellos.

La meteorización de los FM, de los VVC y de los VVI, se evalúa a través de la disolución de estos tres materiales individualmente en cada uno de los reactivos propuestos. Para ello se realizó un experimento de disolución o meteorización experimental que requirió de un diseño estadístico completamente aleatorio de efectos fijos y de arreglo factorial 3^2 .

Previamente se realizó un experimento prueba de disolución con reemplazos, con los tres materiales (FM, VVI y VVC) y con tres reactivos [ácido húmico (AH), agua acidulada (AA) y ácido oxálico (AO)] durante 30 días, con el objetivo de observar el comportamiento del pH y de la conductividad eléctrica (CE), medidos diariamente, y observar cambios que permitieran definir estados de equilibrio, precipitación o disolución de éstos materiales en tales reactivos. Con los datos obtenidos de pH y CE, se realizaron dos gráficas: pH vs Tiempo y CE vs Tiempo; en estas gráficas se encontraron dos cambios importantes en la pendiente de las curvas, los cuales coincidían entre sí para los tres minerales. Estos cambios permitieron definir tres zonas con comportamientos diferentes, la primera, con una pendiente del 50% definida con los datos tomados entre los días 1 y 11; la segunda, con una pendiente del 30%, definida con los datos tomados entre los días 12 y 21 y la tercera, con una pendiente del 12%, definida con los datos tomados entre los días 22 y 30.

Con base en la pendiente observada en cada zona en el experimento prueba, se definieron tres ciclos en la periodicidad de muestreo. Para la zona de mayor pendiente (la primera) se adjudicó el mayor número de muestreos, en este caso cada cinco días; para la segunda zona, un muestreo menor, cada 10 días y, para la menos pendiente el menor número de muestreos, cada 15 días. El muestreo se realizó durante casi 2 años, definidos así: En el primer ciclo (225 días) se muestreó cada 5 días obteniéndose 45 muestreos; en el segundo ciclo (220 días) se muestreó cada 10 días y se obtuvo 22 muestras; en el tercer ciclo (180 días), se muestreó cada 15 días y se obtuvieron 12 muestras.

La idea de utilizar diferentes días de muestreo (5, 10 y 15) obedece al deseo de determinar el efecto de disolución en el tiempo para asegurar que el sistema siempre este en desequilibrio y a que, como se están utilizando soluciones no amortiguadas de pH, se busca que el reactivo límite no sean los protones. De esta forma se asegura que existan suficiente acidez y agentes complejantes para que la reacción de disolución siempre ocurra.

Para la obtención de los FM, de los VVI y de los VVC, se tomaron 100 kilos de pumita y 100 kilos de ignimbrita. Los 100 kilos de las rocas pumítica e ignimbítica fueron sometidas a un baño de limpieza con agua y un detergente líquido a fin de eliminar óxidos superficiales, suciedad y materiales extraños adheridos; después lavado con agua para eliminar los residuos de detergente. Se trituraron hasta obtener una fracción del tamaño de arena gruesa, luego, por selección granulométrica se obtuvieron 350 g de la fracción entre 0.106 y 0.05 mm (arena fina), fracción similar al tamaño promedio de las cenizas volcánicas (Fisher & Schmincke, 1984) encontrada en los suelos.

Los 350 g de material molido de cada una de las rocas se llevó al Isodinámico (separador magnético) donde se obtuvieron dos fracciones: 1) una "pesada" que se descartó por contener en mayor proporción, ferromagnesianos, zircons y magnetitas que no eran de interés para esta investigación y, 2) una fracción "liviana" que contenía los VVI, los VVC, los FM, cuarzos y feldespatos de manera dominante, esta fracción fue de 250 g, aproximadamente. Para separar los FM y los VV de la fracción liviana en cada una de las rocas se empleó el método densimétrico a través de un embudo de separación utilizando bromoetano ($G=2.46$) y bromoformo ($G=2.44$). Después de estos tratamientos se obtuvieron 120 g de VVI, 115 g de VVC y 125 g de FM. La pureza de estos materiales se evaluó por recuento de granos en un microscopio óptico. Los FM y los VVC presentaron una conta-

minación con ferromagnesianos, cuarzo, feldespatos, zeolitas en un 10% y, los VVI con cuarzo y feldespato en un 5%.

Para la disolución de los FM y de los VV se prepararon los tres reactivos AA a una concentración 0.03 mN y su respectivo blanco a una concentración 0.003 mM. AO a una concentración de 0.33 mM y llevada con HCl a un pH de 5.0, para evaluar el efecto de un quelato bidentado. El blanco es agua. El AH, se preparó a una concentración de 30 ppm; a esta solución se le agregaron dos gotas de formaldehído al 37% para evitar la formación de hongos. El blanco de este reactivo se preparó de igual forma excepto que no se le agregaron 0.15 g de AH.

El efecto de la disolución de los FM, los VVC y los VVI, se evaluó midiendo el grado de alteración física y química que presentaban estos materiales una vez culminado cada ciclo; en este caso solo se describe la alteración física para lo cual se utilizan poblaciones de partículas y no una partícula individual. Dado su tamaño (<0.106 mm de diámetro), resulta imposible medir una misma partícula y seguir su estado de alteración por los tratamientos. El estudio de la alteración física de los FM y los VVI y los VVC, se inicia con la caracterización física que se realiza a través del siguiente procedimiento:

1. En cada material se observa la forma, los bordes, las superficies, las adherencias, la fractura, la cristalinidad, el relieve, el color, para lo cual se utilizan la microscopía óptica y la electrónica de barrido;
2. Posteriormente, se realiza el análisis de los efectos de la alteración física en cada uno de los materiales considerados;
3. Se determina el área superficial específica, mediante la interpretación de la isoterma de adsorción de N₂ (interpretación de la isoterma mediante el método BET Branauer-Emmett-Teller; **Branauer et al.**, 1938) que permite medir el efecto que tienen los tratamientos sobre la superficie de los materiales.

El estudio de la alteración física de los FM, los VVI y los VVC, parte de tres supuestos:

1. Los materiales (FM, VVC y VVI) antes de ser sometidos a la disolución, en todas sus propiedades físicas, tienen, en promedio, características homogéneas en cuanto a: forma, cristalinidad, composición química y tamaño (entre 0.106 y 0.05 mm de diámetro). En estos parámetros la desviación estándar de las poblaciones es muy pequeña y la media es muy cercana al de la malla seleccionada (-140+200);

2. La variación de las propiedades físicas es indicativa del grado de evolución de la alteración física. Se espera que la homogeneidad en las características, va a ser transformada por el efecto del AH, el AO y el AA. Posteriormente se mide que tanto varían en los FM, los VVC y los VVI estos parámetros;
3. las transformaciones físicas y químicas de los FM, los VVC y los VVI, ocurridas se observan como cambios físicos en la forma, reducción de tamaño, incremento del área superficial específica, grado de cristalinidad, transformación de superficies y bordes.

Resultados y discusión

A continuación se evalúan los cambios físicos cualitativos y cuantitativos ocurridos en los tres ciclos de disolución en los FM, los VVC y los VVI, y se comparan con el estado inicial de referencia, para establecer su grado de alteración. Las Figuras 2, 3 y 4, muestran el efecto de la disolución en los tres materiales.

Durante el primer ciclo de disolución, los FM, los VVC y los VVI, presentan rasgos de alteración física, la cual, se evidencia por la disminución de las adherencias superficiales, el aumento de la corrosión superficial, la formación de numerosas grietas de escasa longitud, el ensanchamiento y la profundización de otras preexistentes. El agrietamiento produce en algunos granos un aspecto de “resquebrajado” y con el progreso de la alteración se presenta el “fracturamiento” del grano; a medida que aumenta la disolución de los materiales se produce una desintegración fuerte del grano. Muchos rasgos se acentúan, los bordes se redondean, se corroen o aplanan, Figuras 2, 3 y 4.

En el segundo ciclo de disolución se observa un incremento de la alteración; muchos rasgos se acentúan fuertemente en algunos granos. Se evidencia un aumento en la corrosión superficial y se produce descamación o alteración esferoidal, hay un aumento de cristales negativos, oquedades y aparecen inclusiones. Los bordes de los granos se ven altamente corroídos, aplanados o extremadamente angulosos y ahusados en sus extremos, figuras 2, 3 y 4.

En el tercer ciclo se observa un mayor incremento en la alteración de los materiales; muchos rasgos se multiplican y se acentúan fuertemente. Se hace evidente un aumento en la corrosión superficial y se aumentan las estrías. El descascaramiento es más fuerte; las grietas se alargan, se profundizan y se ensanchan; aumentan los cristales negativos y en las oquedades. Las superficies se vuelven roñosas o verrucosas, igualmente se destapan inclusiones

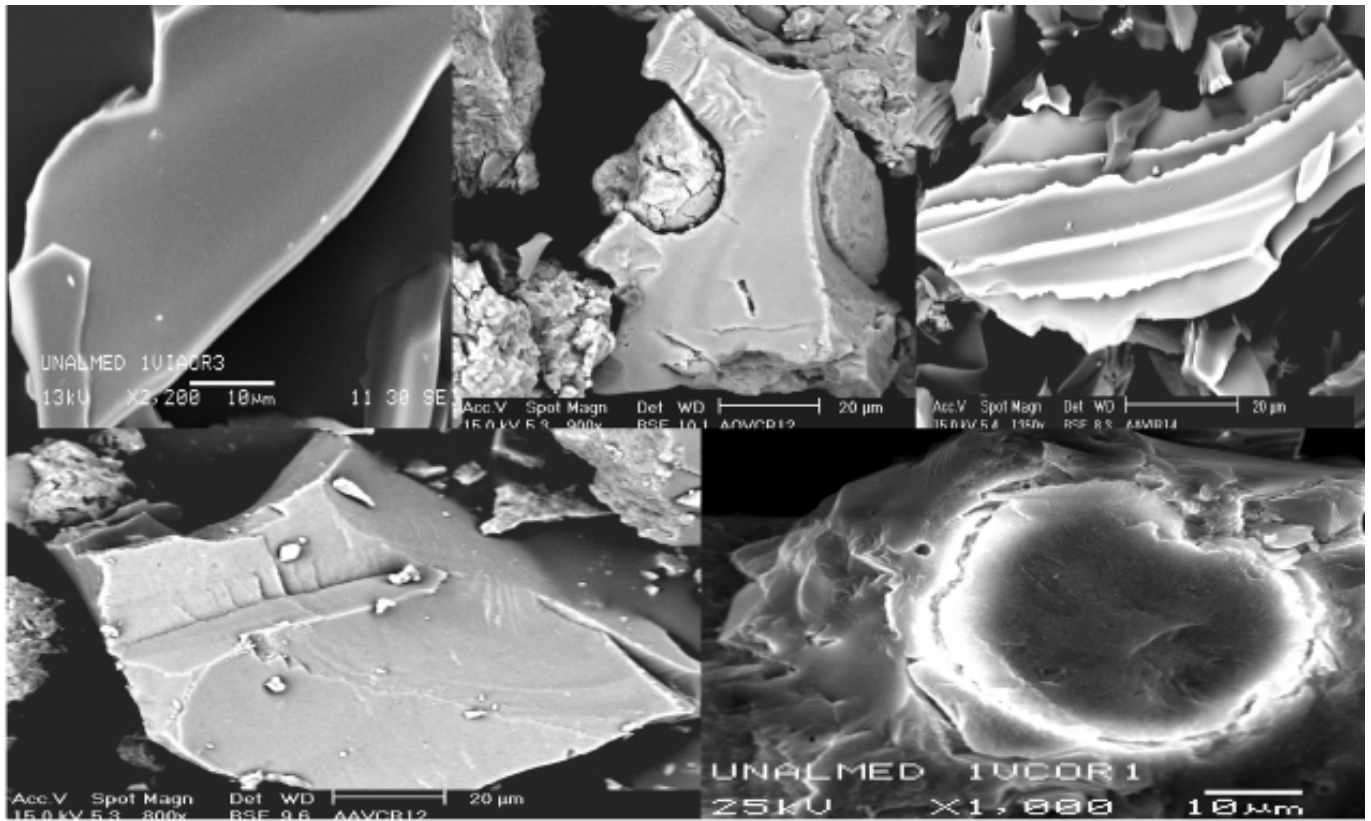


Figura 2. Características de los bordes después de la disolución por efectos del AH, el AA y el AO.
a: bordes lisos; **b:** bordes redondeados; **c:** bordes dentados; **d:** bordes angulosos; **e:** anillos de hidratación.

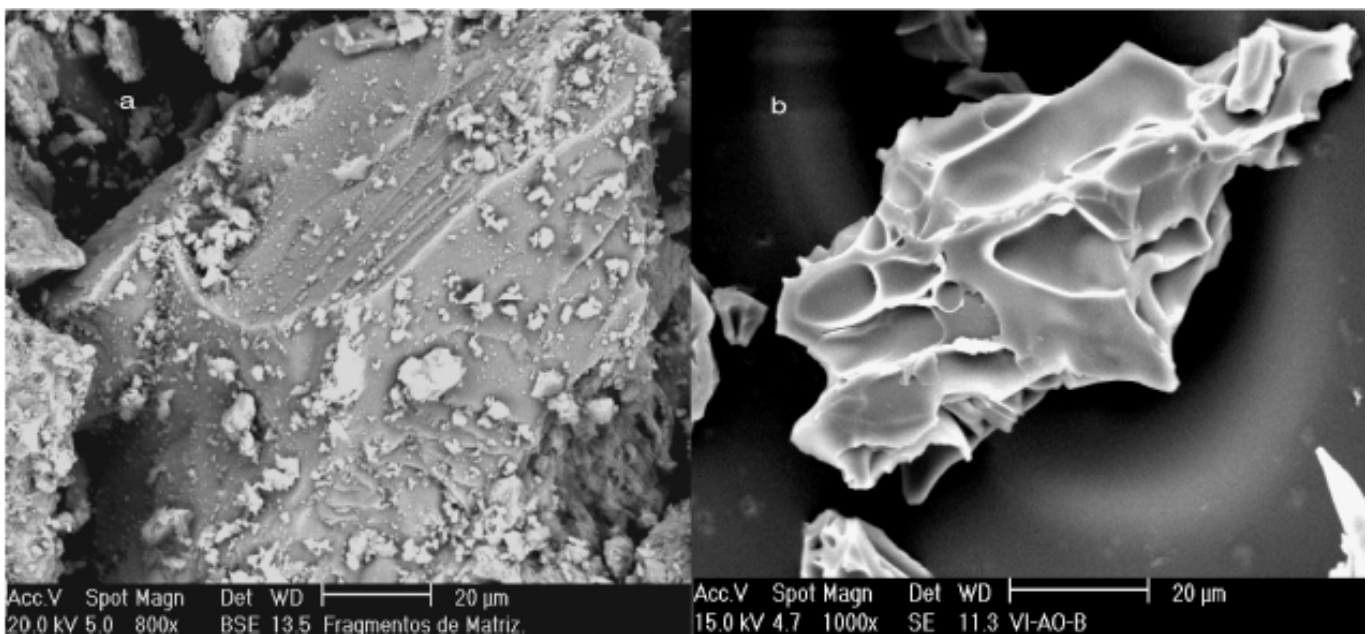


Figura 3. Características de la fractura después de la disolución por efectos del AH, el AA y el AO.
a: concoidea; **b:** irregular.

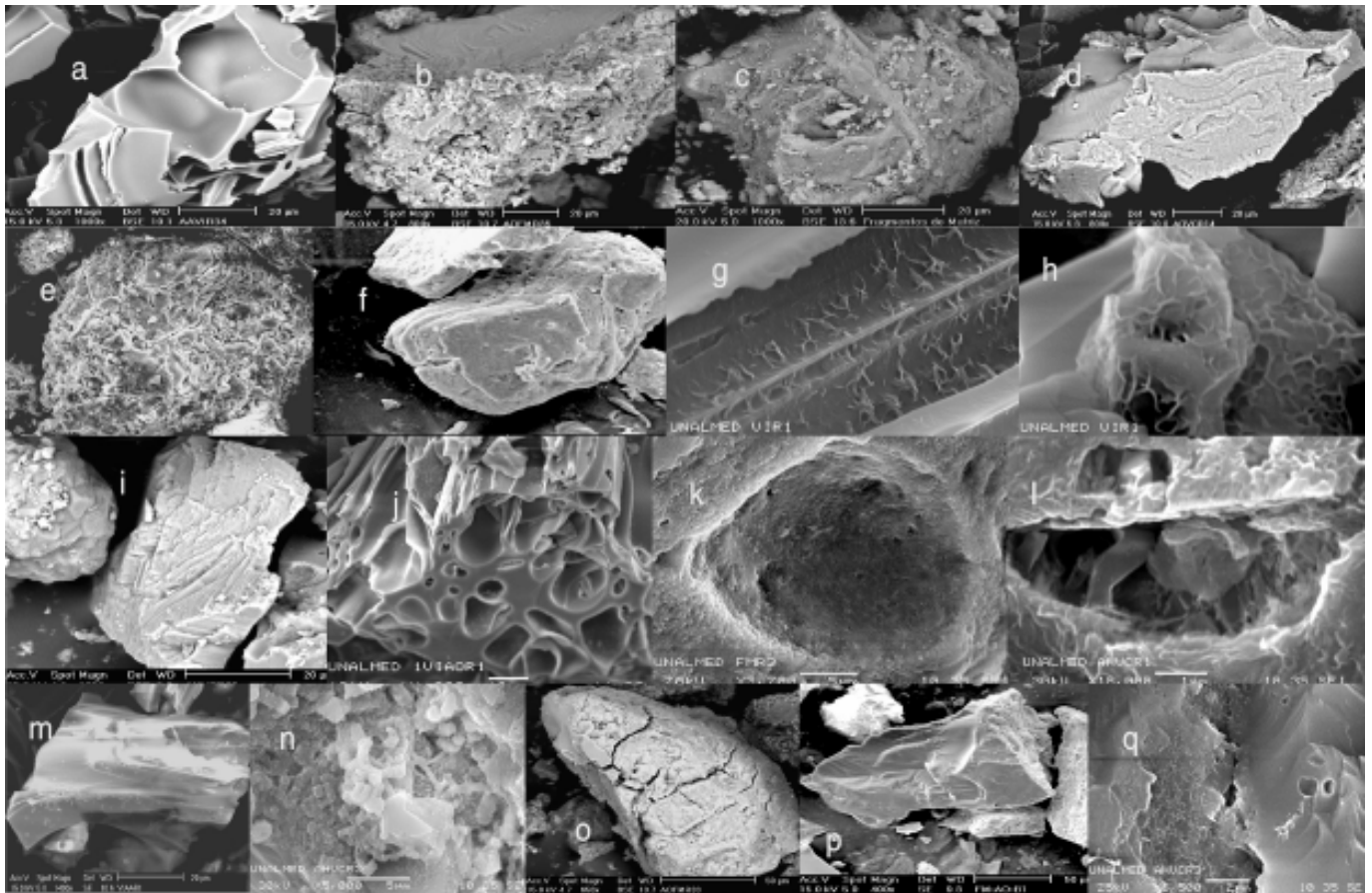


Figura 4. Características de las superficies después de la disolución por efectos del AH, el AA y el AO.

a: lisas; **b:** corroídas; **c:** pulverulentas; **d:** acanaladas; **e:** escamosas; **f:** descamadas; **g:** especuladas; **h:** alveoladas; **i:** reticuladas; **j:** foveoladas; **k:** crateriformes; **l:** surcadas; **m:** punteadas; **n:** verrucosas y/o granuladas; **o:** ruminadas; **p:** estriadas; **q:** fenestradas.

de minerales, principalmente en los FM como resultado de la intensa disolución. Los bordes de los granos son altamente alterados, algunos se aplanan o se vuelven extremadamente angulosos y muestran con terminaciones ahusadas, Figuras 2, 3 y 4.

Los FM, presentan un aspecto lechoso y opaco. El color descrito inicialmente no cambia. Los bordes se vuelven más irregulares y en algunos granos se redondean. Las formas siguen siendo irregulares o ligeramente tabulares; muy pocos FM aparecen como placas o láminas. En la mayoría de los granos las superficies se vuelven altamente irregulares, las grietas se ensanchan y profundizan y aumentan en sentido longitudinal simulando un aspecto de “resquebrajamiento”; muchas de las adherencias desaparecen, lo que hace posible la diferenciación de algunas superficies lisas, que contrastan con una cara completamente corroída, en donde, además, es notoria la formación de canales sinuosos y pequeñas escamas que dan la apariencia de “descama-

ción”. La disolución permite ver algunas caras de minerales embebidas dentro del fragmento pero sin ser diferenciables. La fractura sigue siendo concoidea y en algunos granos, irregular. Las inclusiones de minerales se encuentran alteradas y sus cavidades presentan bordes abiertos y corroídos. El grado de alteración es Alto.

Los VVC, conservan su aspecto vítreo con el tratamiento, algunos son lechosos. En algunos granos no se observa cambios de color; en otros, este es evidente y se manifiesta como una tenue coloración amarillenta, muy incoloro hacia los bordes. Los bordes son, por lo general, irregulares; redondeados o angulosos. La mayoría de los granos tienen formas irregulares y son menos frecuentes las formas laminares, pocas veces se encuentran como sólidos tabulares. Las superficies son irregulares y contrastan en muchos granos con superficies lisas, algunas de ellas muy corroídas. Son evidentes las grietas de esca-

sa longitud y profundidad y las acanaladuras sinuosas que se dejan observar debido a que muchas de las adherencias iniciales se han perdido, aunque, algunos granos aún presentan adherencias de aspecto terroso y de color negro. La fractura es concoidea e irregular. Las inclusiones de zeolitas se han transformado a otros materiales de aspecto terrosos e internamente agrietados, o han desaparecido completamente y en este caso la cavidad ha intercrecido numerosas partículas ligeramente redondeadas, como ampollas, o verrugas, de aspecto “botroidal” o como “huevos de pez”. Las superficies son irregulares y con un avanzado estado de corrosión, el descamación es frecuente, lo mismo que la escamosidad y el agrietamiento, que en algunos casos, llega a producir la fragmentación del grano; en las superficies también se observan canales sinuosos muy profundos. Las adherencias prácticamente no existen o son escasas. Se observan anillos de hidratación en los bordes de antiguas vesículas que sirvieron de cavidad a las zeolitas. El grado de alteración es Medio-Alto.

Los VVI conservan su aspecto esquelético y cavernoso; son vítreos e incoloros. Los bordes son lisos, redondeados o curvoplanares; en algunos ya se observan bordes dentados o aserrados en forma de “dientes de tiburón”. Las formas siguen siendo irregulares, como láminas planas o como tubos unidos formando tabiques. Las superficies son lisas y suaves, pero en algunos granos ya se visualizan rasgos de alteración como corrosión y formación de pequeñas partículas, ligeramente redondeadas en forma de ampollas o “huevos de pez”, localizadas en las partes más internas de los canales o tabique o en las paredes; en ellas se observan pocas adherencias, muchos se encuentran fracturados y su fractura es concoidea. El grado de alteración es Bajo.

Algunos rasgos específicos que se muestran en las superficies de los FM, de los VVC y de los VVI, como consecuencia de la alteración física producida por la disolución con AA, AO y AH, ocurrida durante 625 días, se describen y se denominan con base en terminología ampliamente utilizada en otras ciencias; la mayoría de ellos ya han sido registrados por otros investigadores en minerales como feldespatos, piroxenos y anfíboles, bajo nombres similares a los que se emplean aquí y como resultado de los diversos agentes de alteración ya sea en su ambiente natural o por el efecto de una disolución experimental.

Características de los bordes:

Lisos: Muchos VVI conservan bordes lisos sin evidencia de ser alterados por el proceso de disolución; éstos se

observan tanto en las poblaciones de granos antes de ser sometidos a la disolución como en poblaciones sujetas a la disolución. En los VVC y en los FM; solo es posible encontrarlos en el 1er. Ciclo, a medida que transcurre la disolución se vuelven irregulares, Figura 2a.

Redondeados: Algunos bordes se redondean y se vuelven curvos tanto en su sentido más longitudinal como en el sentido volumétrico. Son muy frecuentes en los VVI y en los VVC, en los cuales, se visualizan bien cuando las vesículas antes ocupadas por zeolitas, exhiben su forma, una vez que ésta se ha disuelto completamente. Estos bordes redondeados también se manifiestan por el proceso de disolución que pule superficies, Figura 2b.

Dentados o Aserrados: Son bordes en forma de “dientes de tiburón”, pequeños y con terminaciones ahusadas, muy comunes en los VVI. Se evidencian mejor a medida que avanza la alteración, después del 3er. ciclo de disolución, Figura 2c.

Angulosos: Son bordes con terminaciones muy pronunciadas y bastante irregulares, frecuentes en los tres materiales, en los cuales se comienzan a observar desde el inicio de la disolución, Figura 2d.

Anillos de hidratación: Frecuentes en los VVC, en los cuales se localizan alrededor de vesículas pero también se observan en los bordes de los VVI y esta es una evidencia del estado de hidratación después del 3er. ciclo de disolución, Figura 2e.

Características de la fractura:

Concoidea: Muy bien desarrollada en los VVI y en los FM, Figura 3a.

Irregular: Muy bien desarrollada en los tres materiales, Figura 3b.

Características de las superficies:

Lisas: Sin huellas de disolución, Figura 4a.

Corroídas: Superficies totalmente alteradas por el proceso de disolución, muy común en los FM y en los VVC, menos frecuente en los VVI en ellos solo se presenta después del 3er. ciclo de disolución, Figura 4b.

Pulverulentas: Con una cubierta de polvo diminuta. Es muy común en los tres materiales, principalmente en el estado previo a la disolución, Figura 4c.

Acanaladas: Con surcos longitudinales. Muy comunes y frecuentes en los FM y en los VVC, ellas se acentúan

y profundizan a medida que avanza la alteración de estos, Figura 4d.

Escamosas: Con estructura en forma de escamas, se ven como pequeñas escamas ligeramente redondeadas y dispuestas cerca unas de las otras; son muy frecuentes en los FM y en VVC, se visualizan bien después del 1er. ciclo de disolución y alcanzan su mayor desarrollo después del 3er. ciclo. No se observaron en los VVI, Figura 4e.

Descamadas: Muy similares a las escamosas pero en este caso el grano alterado se va descascarando en forma de una “cebolla de huevo”, es muy frecuente en los FM y en los VVC. Es muy evidente a partir del 2do. ciclo de disolución. No se observó en los VVI, Figura 4f.

Especuladas: Con cristales o apéndices espiciformes muy pequeños y superficiales. Es posible que esta textura superficial corresponda a un intercrecimiento de un mineral de neoformación, el cual fue imposible identificar por microscopía electrónica. Se observó solo en los VVI, Figura 4g.

Alveoladas: Con depresiones en forma de panal o a un “nido de abejas”. Es posible que esta textura superficial corresponda a un intercrecimiento de un mineral de neoformación, el cual fue imposible identificar por microscopía electrónica. Se observó solo en los VVI, Figura 4h.

Reticuladas: Semejante a una redcilla de escaso relieve, muy frecuente en las superficies de los FM y común en la de los VVC y observable a partir del segundo ciclo de disolución, esta superficie reticulada es más evidente a medida que avanza el proceso de disolución y es muy marcada después de los 625 días. No se observó en los VVI, Figura 4i.

Foveoladas: Con marcas en forma de pequeños hoyuelos circulares o elongados. Formada por el tipo de magma y el cambio brusco de temperatura al ser eyectado. Con la disolución estos foveolos aumentan su tamaño, sus paredes se adelgazan y ocasionalmente se rompen quedando intercomunicados varios foveolos, son muy comunes en los VVI, Figura 4j.

Crateriforme: Se manifiesta a través de huecos abiertos, profundos o superficiales, subredondeados, con bordes corroídos o lisos, bastante frecuentes en los VVC, en los cuales quedan como consecuencia de la disolución de las inclusiones de zeolitas. Estas superficies se observan después del 2do. ciclo de disolución, Figura 4k.

Surcadas: Con depresiones largas y acanalada. Es muy común en los FM y en los VVC. En los FM esta estructura fue observada después del 1er. Ciclo de disolución y en ella se pudieron diferenciar algunos cristales aciculares, posiblemente de rutilo. En los VVC esta estructura se observó después del 3er. Ciclo, Figura 4l.

Punteadas: Numerosos puntos o depresiones muy pequeñas. Frecuente en los FM y en los VVC, menos común en los VVI, en los cuales solo fue observada después del 3er. ciclo de disolución, Figura 4m.

Verrucosas - Botroidales o Ampolladas: En forma de huevos de pez o de estructura parecida a ampollas. Es una estructura muy común en los VVC y en los FM. Se forma por el intercrecimiento de numerosas partículas redondeadas que se localizan muy próximas unas de otras dando la apariencia de verrugas. Aparecen después del 2do. ciclo de disolución, Figura 4n.

Granuladas: Con pequeños granos redondeados o subredondeados o ligeramente rectangulares. Muy frecuente en los VVC y los FM, menos común en los VVI, después del 3er. ciclo de disolución, Figura 4n.

Ruminadas: Son profundas grietas que se inician en la superficie y van profundizando hasta ocasionar la fragmentación de este. Es muy común en los FM y en los VVC, estas grietas van creciendo a medida que avanza el proceso de disolución, después del 3er. ciclo, en el grano producen la desintegración de este. No se observan en los VVI, Figura 4o.

Estriadas: Con rayas longitudinales. Es muy común en los tres materiales y acompaña siempre la fractura concoidea. Se hace muy evidente con el proceso de disolución, Figura 4p.

Fenestradas: Con marcas en forma de pequeños hoyuelos o aréolas. Muy común en los FM, frecuentes en los VVC y escasos en los VVI, en los cuales, su cantidad produce la estructura punteadas descritas antes y solo se presenta después del 3er. Ciclo, Figura 4q.

Área Superficial Específica - Área BET

El Área Superficial Específica o Área BET, medida en los FM, en los VVC y en los VVI, permite evaluar cuantitativamente el grado de alteración ocurrido en estos materiales por el efecto de disolución en AH, AA o AO, si esta se incrementa, implica que ha aumentado la superficie de reacción del material.

Para realizar esta evaluación se midió inicialmente, el área superficial a estos materiales antes de someterlos a los

diversos tratamientos. En la Tabla 1, se presentan los resultados del área BET medida a los tres materiales antes y durante los tres ciclos de disolución y en la Figura 5, la representación esquemática del comportamiento de estos materiales en los tres ciclos y bajo el efecto de los tres reactivos.

Los FM presentaron la mayor superficie específica ($22,6225 \pm 0,3622 \text{ m}^2/\text{g}$), seguidos por los VVC ($14,1725 \pm 0,2693 \text{ m}^2/\text{g}$) y éstos, por los VVI ($1,6741 \pm 0,3261 \text{ m}^2/\text{g}$). El análisis se efectúa para cada material y dentro de éste, se comparan los tres resultados obtenidos en los tres ciclos en cada reactivo, valores seguidos por una letra igual no representan diferencias significativas en un intervalo de confianza del 95% y valores seguidos por una letra diferente representan diferencias significativas a un intervalo de confianza del 95%.

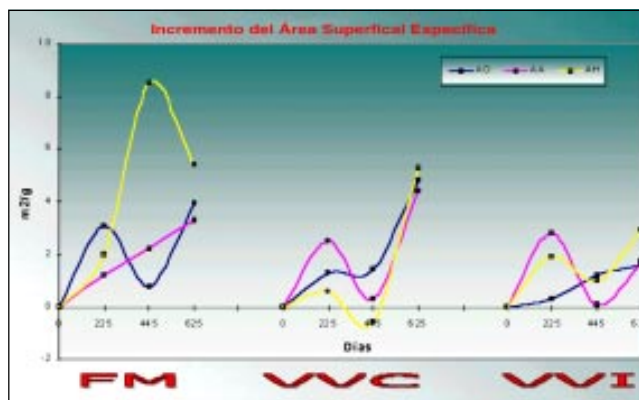


Figura 5. Comportamiento del área superficial específica en los FM, los VVC y los VVI por el efecto de la disolución en AH, AA y AO durante los tres ciclos.

Tabla 1. Relación de áreas superficiales específicas medidas después del primer, segundo y tercer ciclo de disolución en los VV y los FM.

| Área BET Inicial m^2/g | Ciclos | Área Superficial Específica Bajo el Efecto de los Reactivos | | |
|---|--------|---|-------------------------------|-------------------------------|
| | | Ácido Oxálico | Agua Acidulada | Ácidos Húmicos |
| VVI $1,6741 \pm 0,3261$ | 1er. | $1,9624 \pm 0,4109 \text{c}^*$ | $4,5273 \pm 0,5272^a$ | $3,5511 \pm 0,8289 \text{c}$ |
| | 2do. | $2,9223 \pm 0,4109 \text{b}$ | $1,7757 \pm 0,315 \text{c}$ | $2,6960 \pm 0,5475 \text{b}$ |
| | 3er. | $3,2388 \pm 0,0 \text{a}$ | $3,4059 \pm 0,048 \text{b}$ | $4,6240 \pm 0,0656 \text{a}$ |
| VVC $14,1725 \pm 0,2693$ | 1er. | $15,4673 \pm 0,4158 \text{c}$ | $16,6594 \pm 0,5356 \text{b}$ | $14,8122 \pm 0,3279 \text{b}$ |
| | 2do. | $15,5524 \pm 0,2236 \text{b}$ | $14,4794 \pm 0,2873 \text{c}$ | $13,5767 \pm 0,3568 \text{c}$ |
| | 3er. | $18,9800 \pm 0,1614^a$ | $18,600 \pm 0,2279 \text{a}$ | $19,4420 \pm 0,0181^a$ |
| FM $22,6225 \pm 0,3622$ | 1er. | $25,6890 \pm 0,3503 \text{b}$ | $23,8141 \pm 0,3107 \text{c}$ | $24,6034 \pm 0,6091 \text{c}$ |
| | 2do. | $23,4325 \pm 0,3498 \text{c}$ | $24,7493 \pm 0,3250 \text{b}$ | $31,0658 \pm 0,3776 \text{a}$ |
| | 3er. | $26,5200 \pm 0,2324^a$ | $25,849 \pm 0,1794 \text{a}$ | $28,0100 \pm 0,0226 \text{b}$ |
| Área superficial específica sin el efecto de los reactivos | | | | |
| VVI $1,6741 \pm 0,3261$ | 1er. | $1,6858 \pm 0,1644 \text{b}$ | $3,1006 \pm 0,5071^a$ | $3,6857 \pm 0,7439 \text{b}$ |
| | 2do. | $1,5990 \pm 0,3957 \text{c}$ | $2,9321 \pm 0,7057 \text{b}$ | $3,4174 \pm 0,6029 \text{c}$ |
| | 3er. | $3,2288 \pm 0,0847 \text{a}$ | $3,1063 \pm 0,026 \text{a}$ | $3,9200 \pm 0,0057 \text{a}$ |
| VVC $14,1725 \pm 0,2693$ | 1er. | $17,1164 \pm 0,2529 \text{b}$ | $16,6772 \pm 0,3670 \text{b}$ | $14,4523 \pm 0,3331 \text{b}$ |
| | 2do. | $14,6639 \pm 0,3834 \text{c}$ | $14,8353 \pm 0,2529 \text{c}$ | $14,4783 \pm 0,2850 \text{b}$ |
| | 3er. | $18,8130 \pm 0,1938^a$ | $17,0300 \pm 0,2041 \text{a}$ | $18,5520 \pm 0,1502^a$ |
| FM $22,6225 \pm 0,3622$ | 1er. | $26,8045 \pm 0,4001^a$ | $23,1152 \pm 0,7545 \text{b}$ | $25,4888 \pm 0,4252 \text{c}$ |
| | 2do. | $25,6345 \pm 0,4897 \text{c}$ | $22,4347 \pm 0,2834 \text{c}$ | $26,4764 \pm 0,3250 \text{b}$ |
| | 3er. | $26,1700 \pm 0,3552 \text{b}$ | $23,8000 \pm 0,2867^a$ | $28,8800 \pm 0,2888^a$ |

* El análisis se efectúa para cada material y dentro de éste, se comparan los tres resultados obtenidos en los tres ciclos en cada reactivo, valores seguidos por una letra igual no representan diferencias significativas a un intervalo de confianza del 95% y valores seguidos por una letra diferente representan diferencias significativas a un intervalo de confianza del 95%.

Primer ciclo: La superficie específica medida a los FM, a los VVC y a los VVI, antes de iniciar la disolución es mucho más baja que la registrada después del primer ciclo por el efecto de la disolución con AH, AO y AA y sus respectivos blancos. De acuerdo con la Tabla 1, todos los materiales incrementan su área superficial, en los FM en un 8.8% con AH, un 13.7% con AO y en un 5.3% con AA. En los VVC en un 4.2% con AH, en un 9.2% con AO y en un 17.6% con AA. En los VVI en un 11.8% con AH, en un 17.6% con AO y en un 165% con AA. La variación en la superficie específica de estos materiales supone una mejora en la capacidad de su disolución. Durante este ciclo los tres materiales presentan diferencias significativas entre ellos a un intervalo de confianza del 95%.

Segundo ciclo: Al comparar el área superficial medida a los FM, los VVC y los VVI en el estado inicial, con los obtenidos en el primer ciclo, y con los obtenidos en el segundo ciclo, bajo el efecto del AH, AO y AA y sus respectivos blancos, está se incrementa notoriamente en todos los materiales, como se puede ver en la Tabla 1, durante este ciclo, en los FM, en un 37.6% con AH, un 3.5% con AO y en un 9.7% con AA. En los VVC en un 4.2% con AH, en un 9.9% con AO y en un 2.1% con AA. En los VVI en un 58.8% con AH, en un 70.6% con AO y en un 5.9% con AA.

Los VVI, incrementan más su área superficial con AO, luego con AH y, por último, con AA, sin el efecto de los reactivos (blancos), el incremento es mayor con AH, luego con AA y, por último, con AO.

Los VVC incrementan más su área superficial bajo el efecto del AO, luego con AA y, por último, con AH, sin el efecto de los reactivos, la relación se invierte siendo mayor el área superficial con AA, luego con AO, y por último, con AH. En los FM bajo el efecto de los reactivos, el mayor incremento del área superficial se logra con AH, luego con AA, por último, con AO; sin el efecto de los reactivos los AH son los que más incrementan el área seguidos del AO y luego del AA. Durante este ciclo los tres materiales presentan diferencias significativas entre ellos a un intervalo de confianza del 95%.

Tercer ciclo: Al comparar el área superficial medida a los FM, los VVC y los VVI en el estado inicial, con los obtenidos en el primer y segundo ciclo con los de este ciclo, bajo el efecto del AH, AO y AA y sus respectivos blancos, puede observarse, como se muestra en la Tabla 1, que en todos los materiales ésta se incrementa notoriamente; un caso muy particular lo traen los FM, que aumentan su área específica desde un valor inicial de 22.6225 m²/g, al inicio, hasta un valor de 28.0100 m²/g, bajo el efecto del AH, y hasta 28.8800 m²/g, sin el efecto del AH, en el

tercer ciclo. Durante este ciclo los FM incrementan su área superficial en un 23.9% con AH, un 17.3% con AO y en un 14.6% con AA. En los VVC en un 37.3% con AH, en un 33.8% con AO y en un 31% con AA. En los VVI en un 171% con AH, en un 94.1% con AO y en un 100% con AA; sin el efecto de los reactivos (blancos), el mayor incremento del área superficial de los VVI y de los FM es mayor con AH, luego con AO y, por último, con AA, en los VVC el incremento del área superficial es más alto con AA, luego con AO y por último con AH pero, los valores entre estos son realmente muy cercanos. Durante este ciclo los tres materiales presentan diferencias significativas entre ellos a un intervalo de confianza del 95%. Con y sin el efecto de los reactivos, el que más incrementa el área superficial específica en los tres materiales es el AH, luego el AO y, por último, el AA. Durante los tres ciclos bajo el efecto de los reactivos, los tres materiales presentan diferencias significativas tanto, entre ellos, como entre los ciclos y entre los reactivos, sin el efecto de los reactivos los tres materiales presentan diferencias significativas entre los tres ciclos excepto en los VVI que no tienen diferencias significativas en el primer y tercer ciclo con AA y en los VVC en el primer y segundo ciclo con AH, estos comportamientos se pueden observar en la Figura 5.

Conclusiones

Los FM son los materiales que presentan mayor superficie específica, mayor superficie de reacción, mayor número de rasgos de alteración superficial como consecuencia de la disolución en AH, AA y AO y son los que producen mayores cantidades de iones de Al^{3+} , Si^{4+} y Fe^{3+} , por ende, son los más susceptibles de ser meteorizados, siguen a estos los vidrios volcánicos.

Dentro de los vidrios volcánicos se diferencian los VVC y los VVI, de estos dos son más susceptibles de meteorizarse los primeros y las velocidades de disolución entre ellos son bastante diferentes; en los vidrios incoloros son extremadamente lentas hecho que hace que sean considerados como un material inerte frente a los procesos de disolución, por lo menos, en la meteorización experimental con AA, AO y AH, durante dos años.

Con el tiempo de disolución se observa un incremento en la alteración de estos materiales, en ellos, muchos rasgos se multiplican y se acentúan fuertemente. En los FM es donde se evidencian mayores marcas o rasgos de alteración y de los vidrios son más afectados los VVC que los VVI, en éstos, solo se manifiestan a partir del segundo ciclo y son, por lo general, leves, comparadas con las observadas en los FM y en los VVI.

Los rasgos más frecuentes que aparecen en las superficies de estos materiales son: Presencia de bordes lisos, redondeados, aserrados o dentados, comúnmente en los VVI; bordes angulosos y con terminaciones ahusadas, frecuentes en los FM y en los VVC. En los VVC se presentan anillos de hidratación como respuesta del estado de hidratación de éstos. En los VVI se observan superficies lisas sin huellas de disolución y pueden existir granos con superficies corroídas, aunque este rasgo es mucho más frecuente al final del último ciclo de disolución mientras que en los VVC y en los FM se presenta desde su estadio inicial y va aumentando a medida que aumenta el tiempo de disolución. En los FM y en los VVC se observan superficies pulverulentas, acanaladas, escamosas, descascaradas, reticuladas, crateriformes y son comunes las estructuras surcadas, punteadas, verrucosas, botroidales o ampolladas, granuladas, ruminadas, estriadas y fenestradas; en los VVI son más frecuentes las superficies especuladas, alveoladas y foveoladas.

En cuanto a la forma como se fracturan predominan la concoidea y la irregular en los tres materiales y son comunes las superficies extremadamente angulosas. Esta meteorización se ratifica en el incremento del área superficial específica medida en los tres materiales, en los cuales aumenta notoriamente a medida que avanza el tiempo de disolución, siendo mucho mayor en los FM, luego en los VVC y por último, en los VVI. Bajo el efecto de los reactivos, los tres materiales presentan diferencias significativas tanto, entre ellos, como entre los ciclos y entre los reactivos; sin el efecto de los reactivos los tres materiales presentan diferencias significativas entre los tres ciclos, excepto en los VVI que no tienen diferencias significativas en el primer y tercer ciclo con AA y en los VVC en el primer y segundo ciclo con AH.

Los resultados de esta investigación motivan un cambio en los planteamientos actuales sobre los procesos de andolización; en este caso, se toma en consideración lo observado por los autores en otras investigaciones en cuanto a considerar como material parental de los Andisoles, únicamente a las cenizas volcánicas, y dentro de ellas, a los VV y a los FM. Estos materiales comparten rasgos comunes y exclusivos como el tamaño, la alta superficie específica y su estado de meteorización previo, características que los hacen muy vulnerables a la meteorización una vez son depositados. En este aspecto, para el Soil Taxonomy (USDA, 1988) o el Sistema FAO (FAO, UNESCO, 1988) hay coincidencia en cuanto a que son suelos relativamente jóvenes con unas propiedades únicas que los distinguen pero hay contradicción en cuanto a lo que afirman que “...no siempre se desarrollan a partir de

piroclastos como ceniza volcánica...”, dentro de la definición del Andisol involucran a las pómez, tufitas, cinders, lahar y otros, que por su tamaño o forma de depositarse deben soportar una fragmentación para dar paso a la meteorización a través de la cual se producen los iones Al, Si y Fe que luego se forman los mbgc, como la alófana, la imogolita, etc. En este sentido, todos los suelos que se producen a partir de otras rocas volcánicas como es el caso de la ignimbritas, las andesitas, los basaltos, también serían Andisoles. Las cenizas volcánicas ayudadas por las altas precipitaciones, el buen drenaje que asegure el lavado de bases y la presencia de carbón orgánico, se meteorizan y forman Andisoles bajo dos situaciones:

1. A $\text{pH} < 5.0$, los FM, y los VV, se meteorizan y producen cantidades apreciables de Al, Si y Fe, la materia orgánica compleja el Al y el Fe y forma complejos Al-humus y Fe-humus, y el Si, se precipita y forma ópalos o se lixivia en condiciones de máximo lavado. Si el pH es demasiado ácido, predomina la forma protonada. Esta situación se considera como antialofánica ya que impide la formación de la alofana y la imogolita. En esta investigación no fue posible comprobar este efecto debido a que en ninguno de los sistemas establecidos con los tres materiales y los tres reactivos el pH fue inferior a 5.0, solo en algunas reacciones cuando se analizó los productos de actividad iónica y los sistemas estaban insaturados, fue posible establecer un efecto antialofánico, tal es el caso de los VVC o de los VVI en los blancos del AA o del AO pero, en el segundo ciclo.
2. A $\text{pH} > 5.0$, estos materiales se meteorizan pero la presencia de materia orgánica no alcanza a afectar el Al ni el Fe, entonces el Al y el Si se unen y forman aluminosilicatos y el Fe forma ferrihidrita.

En esta investigación se pudo comprobar que debido a la meteorización de los FM y de los VV a rangos de pH entre 6.0 y 7.2, se producen cantidades suficientes de Al, Si y Fe requeridas para la formación de mbgc, de estos iones, las concentraciones más altas son de Si, hecho que permitiría, si fuera el caso, que se produzcan alófanos ricos en Si (imogolitas). Sin embargo, se requiere de otros factores y cambiar algunas condiciones experimentales para que se formen estos materiales. En ambas situaciones los VV no alcanzan a disolverse totalmente y, quedan en el suelo como depósitos de iones de Al, Si y Fe, esencialmente.

Agradecimientos

Los autores desean expresar un especial agradecimiento a los doctores Raúl Zapata, Raúl Madrinan y Daniel

Jaramillo por la asesoría en lo relacionado a la investigación; del mismo modo al Ingeniero Hernán González de la Universidad Nacional de Colombia por todo el apoyo logístico. A los Ingenieros Orlando Ruiz, Gloria Arango y Gladys Acosta por el apoyo en el trabajo analítico. Al Ingeominas Bogotá y al Laboratorio de Microscopía electrónica de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín por las fotografías en SEM. Al Centro de Investigaciones Ambientales y de Ingeniería (CIA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, a la Universidad Nacional de Colombia, sede de Medellín y al Instituto Agustín Codazzi por el tiempo de los investigadores.

Bibliografía

- Araña S. V., & J. L. Ruiz.** 1974. "Volcanismo, Dinámica y Petrología de sus productos", Ediciones Istmo. Madrid. 220 p.
- Besoain, M. E.** 1972. Mineralogía de las arcillas de los suelos derivados de ceniza volcánica. En: Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina; Turrialba, Costa Rica, 6-13 de junio, p B1.1-B1.13.
- Branauer, D.G.; P.H. Emmett & E. Teller.** 1938. Adsorption of gases in multimolecular layer. In: Journal of the American Chemical Society. 60: 309-319.
- Fisher, R. V. & H. U. Schmincke.** 1984. Pyroclastic Rocks. Springer Verlag. Berlin. 472 pp.
- Flórez M. M. T.,** 2004. Meteorización experimental de los fragmentos de matriz y los vidrios volcánicos. Tesis Ph. D. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. 300p.
- . 2000. Génesis de suelos y paleosuelos ándicos a partir del estudio de pedocomponentes. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 190 p.
- & **L. N. Parra.** 1992. Características texturales en los componentes de las tefras del Norte de la Cordillera Central de Colombia In: Boletín Ciencias de la Tierra No. 11 p 81-104.
- Heiken G. & K. Wohletz.** 1985. Volcanic ash. Univ. of California. Press, Berkeley. C.C. In: Encyclopedia of volcanoes. Ed. Haraldur Sigurdsson. Wiley N.Y. p. 1155.
- Hermelín, M.** 1980. Clasificación de algunos minerales con base en su resistencia a la meteorización química en condiciones tropicales húmedas. Inédito. Medellín 117 p.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC.** 1991. Génesis y taxonomía de los Andisoles Colombianos. Investigaciones. Vol. 3. No. 1. Santafé de Bogotá. 118 p.
- Luna Z. C.** 1963. Anotaciones pedológicas sobre algunos Andosoles de Antioquia. IGAC. Vol. 4, No. 9. Bogotá. Colombia.
- Shoji, S.** 1993. Mineralogical properties of volcanic ash soils. In: N. Yoshinaga (Editor), Volcanic ash soil. Genesis, Properties, Classification. Hakuyusha, Tokyo, pp. 31-72.
- . **R. Dahlgren & M. Nanzyo.** 1993. Genesis of volcanic ash soils. In: Volcanic ash soils: Genesis, properties and utilization. Developments in Soil Science 21. pp: 37-71. Elsevier.
- Silva P. F.** 1953. Comparación de dos sistemas de análisis físico mecánico en suelos tropicales. Medellín. Tesis Univ. Nacional. 121 p.
- Soil Survey Staff (Usda).** 1998. Keys to soil taxonomy. 8ª. Ed. Usda. Washington D. C. 326 p.
- Sparks R. S. et al.** 1977. Volcanic plumes. In: Encyclopedia of volcanoes. Ed. Haraldur Sigurdsson. Wiley N.Y. pp 916-918.
- Turner, F. J. & J. Verhogen.** 1978. Petrología ígnea y metamórfica. Ed. Omega. 726 p.
- Wada, K.** 1977. The distinctive properties of Andosols. In: Advances in soil science. Edited by B.A. Stewart. Springer-Verlag. New York.
- Walker, G. P.** 1971. Grain-size characteristics of pyroclastic deposits. J. Geol. 79: 696-714.

Recibido el 18 de febrero de 2005.

Aceptado para su publicación el 9 de noviembre de 2005.

SÍNTESIS DE POLVOS CERÁMICOS DE CINC - BISMUTO - ALUMINIO - ANTIMONIO - LANTANO Y SU USO EN LA FABRICACIÓN DE VARISTORES

por

J.J. Muñoz¹ & J.E. Rodríguez-Páez¹

Resumen

Muñoz, J.J. & J.E., Rodríguez-Páez: Síntesis de polvos cerámicos de cinc – bismuto – aluminio – antimonio - lantano y su uso en la fabricación de varistores. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **30** (115): 259-269. 2006. ISSN 0370-3908.

Los varistores cambian su resistencia con el voltaje. Estos materiales electrocerámicos suministran una protección fiable y económica contra transitorios de voltaje ocasionados por relámpagos, conmutaciones o ruido eléctrico en las líneas de potencia de corriente continua o alterna. Normalmente se utilizan ZnO, SnO₂ y TiO₂ como compuestos base para la formación de los varistores, adicionándoles otros óxidos para mejorar su comportamiento eléctrico. Aquí se indica como sintetizar la materia prima para obtener varistores, con base en el ZnO, utilizando el método de coprecipitación. Los polvos cerámicos obtenidos se caracterizaron con difracción de rayos X (DRX), análisis térmico diferencial ATD Y espectroscopia infrarroja FTIR; a los materiales sinterizados se les determinaron sus características eléctrica y microestructurales a través de las curvas corriente – voltaje y Microscopía Electrónica de barrido (MEB), respectivamente.

Palabras clave: Síntesis, Varistores, Coprecipitación, ZnO, Caracterización.

Abstract

Varistors are devices that change the resistance with the voltage. This electroceramic materials protect equipment against voltage surges produced by lightning, trading or electronic noise into the power lines of direct or alternating current. The principal oxides used to make varistors are ZnO, SnO₂ and TiO₂ but it is important introduce dopants in the crystalline structure of these oxides to obtain the better electrical properties. In this work we synthesized the raw material to varistors. We utilized the co-precipitation method for these. The ceramic

¹ Grupo CYTEMAC. Departamento de Física – Universidad del Cauca. Calle 5 N° 4-70 Popayán – Cauca. Correo electrónico: jajomucha@hotmail.com, jnpaez@unicauca.edu.co

powders were characterized with X-Ray diffraction (XRD), infrared spectroscopy (FTIR) and differential thermal analysis (DTA). The materials sinterized were characterized with scanning electronic microscopy (SEM) and besides we measured the current and voltage curves of these devices.

Key words: Synthesis; varistors; co-precipitation; ZnO; characterization.

1. Introducción

Los varistores, o resistores variables, son dispositivos de estado sólido cuya resistencia es dependiente del voltaje, corriente o polaridad (**Levinson L.M. et al.** 1986, **Einzinger R.** 1987). Los varistores proporcionan una protección fiable y económica contra transitorios de alto voltaje producidos principalmente por relámpagos, conmutaciones o ruido eléctrico en líneas de potencia de corriente continua o alterna. Las nuevas tecnologías, la nanotecnología y la tecnología plana, requieren de varistores con voltaje de operación muy bajos, de respuesta rápida y alta confiabilidad en servicio. Los varistores tienen la ventaja, sobre los díodos supresores de transitorios, que además de absorber energías transitorias altas permiten suprimir los transitorios positivos y negativos.

Existen diferentes tipos de varistores o resistores variables pero el de naturaleza cerámica es el de mayor importancia tecnológica por sus características eléctricas altamente no lineales; esto permite utilizarlo como interruptor reversible en circuitos de estado sólido con la capacidad adicional de almacenar energía. La característica electrónica de no linealidad le permite sensar y limitar las sobre-tensiones de los transitorios de voltaje; cuando aparece un transitorio éste es absorbido por el varistor protegiendo de esa manera los componentes sensibles del circuito, acción que pueden realizar de manera repetida y sin destruirse (**Gupta T.K.** 1990). Los varistores de óxido de cinc son los más comunes, por su alto rango de voltaje, pero también se utilizan otros semiconductores como los óxidos de estaño y titanio.

El varistor cerámico original fue desarrollado a principios de 1930 en reemplazo, principalmente, de los rectificadores de selenio utilizados para proteger los sistemas telefónicos (**Harnden J.D. et al.** 1972, **Clarke D.R.** 1999). Los materiales desarrollados por la "Bell System" consistieron en partículas de carburo de silicio (SiC) sinterizadas y compactadas. Mejoras en el procesamiento de estos dispositivos tuvieron lugar principalmente en Estados Unidos y Japón. En 1969 M. Matsuoka, investigador Japonés quien había realizado solo una publicación previa en varistores de carburo de silicio, desarrolló los varistores basados en compuestos de Óxido de Zinc

(ZnO). Posteriormente, en 1971, publicó un artículo en el cual describe el proceso de fabricación de los varistores de ZnO que se sigue utilizando. (**Matsuoka M.** 1971). Matsuoka determinó que la presencia de algunos iones, en el sistema es capaz de sustituir al cinc en la red de ZnO, que la sinterización se desarrollaba en presencia de fase líquida debido a la presencia del óxido de bismuto y que los iones de gran tamaño son segregados en el borde de grano. Además, introdujo el uso de manganeso y cobalto como dopantes para mejorar el grado de no linealidad, o coeficiente α , del dispositivo. La extensa literatura publicada desde ese momento ha permitido establecer bases científicas y tecnológicas para el desarrollo de estos dispositivos (**Matsuoka M.** 1971, **Einzinger R.** 1987, **Gupta T.K.** 1990, **Clarke D.R.** 1999).

Funcionalmente los varistores son equivalentes a un diodo Zener "espalda con espalda" y son típicamente usados en paralelo con los circuitos a proteger de las sobretensiones. En su condición normal, estos dispositivos se encuentran a un voltaje por debajo de su voltaje característico de ruptura y por él pasa una pequeña corriente de fuga. Si el voltaje excede el voltaje de ruptura, al presentarse una sobretensión, el varistor se transforma en un buen conductor y permite el paso de una corriente de alta intensidad que conduce usualmente a tierra; cuando el voltaje retorna a su valor normal, el varistor vuelve a su estado de resistencia alta transformándose en un material aislante (**Clarke D.R.** 1999, **Levinson L.M.** 1988). El comportamiento del varistor es reversible con una pequeña histéresis debido a que el dispositivo puede degradarse por la acción de las corrientes eléctricas altas. En la región de pre-ruptura, el varistor es óhmico y la intensidad de corriente de fuga dependerá de la temperatura. Por encima del voltaje de ruptura, campo de conmutación, dos regiones se pueden identificar: una altamente no lineal y otra a altos voltajes, o zona de alza ("up turn"), donde el material es nuevamente óhmico. En la región no lineal, la relación entre la corriente y el voltaje se puede expresar por la ley (**Harnden J.D. et al.** 1972, **Clarke D.R.** 1999).

$$I = KV^\alpha \quad (1)$$

donde α representa el coeficiente de no linealidad y cuyo valor se determina a partir de la pendiente de la curva

voltaje en función de la corriente que representa el dispositivo (**Matsuoka M.** 1971, **Harnden J.D.** 1972). El comportamiento del varistor se justifica considerando la existencia de barreras tipo Schottky en los bordes de grano. Además, el varistor también presenta una capacitancia que varía en las tres regiones. (**Hower P.L., & Gupta T.K.,** 1979).

Aunque el método convencional utilizado en el conformado de los varistores es la mezcla de óxidos, cada día toma más interés sintetizar, principalmente por rutas químicas, la materia prima que se emplea para su fabricación. Los métodos más empleados son: sol-gel (**Sheng Y, et al.** 2000), hidrotermal, precursor polimérico (**Lessing P. A. ,** 1989), precipitación (**Haile S.M. et al.** 1989), entre otros. El objetivo de utilizar los polvos cerámicos obtenidos a través de estos procesos, es el de optimizar la funcionalidad de los varistores y tratar de conformar nanoestructuras con todos los beneficios que ello implica.

En el presente trabajo se sinterizaron polvos cerámicos de cinc – bismuto – aluminio – antimonio y lantano por el método de precipitación controlada, para utilizar en la fabricación de varistores. Se realiza una descripción del proceso de síntesis, a través de las curvas de valoración potenciométrica, y una caracterización adecuada del polvo cerámico obtenido utilizando espectroscopia infrarroja, difracción de rayos x (DRX) y análisis térmico (ATD/TG). Las muestras sinterizadas se caracterizaron eléctrica y microestructuralmente.

2. Procedimiento experimental

2.1. Síntesis de polvos cerámicos de ZnO – Bi₂O₃ – Al₂O₃ - Sb₂O₃ – La₂O₃

Para la obtención de los polvos cerámicos del sistema Zn – Bi – Sb – Al – La, se utilizaron los siguientes precursores: acetato de Cinc (Zn(CH₃COO)₂ Carlo Erba) para obtener el ZnO que constituye la matriz del varistor; acetato de Bismuto (Bi (CH₃COO)₂ - Aldrich Chemical Company) para obtener el Bi₂O₃ que debe segregarse en los bordes de grano y favorecer la formación de las barreras de potencial que requieren los varistores; nitrato de Aluminio (Al (NO₃)₃ - Merck) que permita obtener Al₂O₃ para incrementar el coeficiente de no linealidad y favorecer la formación de corrientes altas de donores en el ZnO; acetato de Antimonio (Sb (CH₃COO)₂ - Aldrich Chemical Company) para obtener el Sb₂O₃ cuya función es incrementar la estabilidad del varistor e inhibir el crecimiento de grano, acetato de Lantano (La (CH₃COO)₂ - Aldrich Chemical Company) que permite obtener el LaO cuya función es favorecer la estabilidad del varistor, inhibir el

crecimiento de grano e incrementar el coeficiente de no linealidad.

Los precursores indicados anteriormente se disolvieron en agua siguiendo la siguiente metodología. La disolución del Zn (CH₃COO)₂ se realizó en 100 ml de una solución 0,1N de HNO₃, agitando continuamente hasta obtener un sistema transparente. Igual se hizo con el Bi (CH₃COO)₂, el cual se disolvió separadamente en 50 ml de una solución 0,4N de HNO₃ la cual fue calentada a 50°C hasta que el sistema se torno totalmente transparente. Similarmente el Al(NO₃)₃ se disolvió en 40 ml de agua destilada mientras que el La (CH₃COO)₂ se disolvió en 40ml de una solución 0,1 N de HNO₃. El Sb(CH₃COO)₂ requirió de un tratamiento especial para su disolución; inicialmente se disolvió en una solución de ácido cítrico y etilenglicol, en una relación 4 a 1 molar, y luego sí se le adicionaron 100 ml de agua al sistema; sólo así se logró una completa disolución de la sal. Se debe mencionar que la cantidad en gramos que se disolvieron, de los precursores utilizados, está relacionada con el porcentaje que de ellos se utiliza en la composición final del producto y con la cantidad de muestra que se desea obtener.

Inmediatamente después de disolver los precursores en soluciones separadas, se procedió a adicionar por goteo NH₄OH agitando continuamente los sistemas a 400 r. p.m, para las soluciones de 100 ml, y a 300 r.p.m. para las soluciones de 50 ml. La adición del NH₄OH se realizó de la siguiente manera. Primero se tomó la solución que contenía el Zn (CH₃COO)₂ y se le adicionó 0,2 ml cada 30 segundos hasta alcanzar un pH de 8.3, valor definido con base en las curvas de valoración potenciométrica obtenidas en trabajos previos (**Cruz A.M.** 2003, **Vidal K.A.** 2003 y **Ávila H.A.** 2004). A la solución que contenía el Bi(CH₃COO)₂ se le adicionó 0,07 ml cada 30 segundos hasta alcanzar un valor de pH determinado de las curvas de valoración potenciométrica y conductimétrica que se indicarán más adelante. A las otras soluciones se les adicionó el NH₄OH con una velocidad diferente, para la solución del Sb(CH₃COO)₂ con etilenglicol y ácido cítrico, se adicionó a 0,06 ml cada 30 segundos a la de Al(NO₃)₃ 0,02 ml cada 30 segundos y para la de la (CH₃COO)₂ 0,025 ml cada 30 segundos. El valor de pH que se alcanzó en cada uno de los sistemas se determinó de las curvas de valoración correspondiente a cada solución. El equipo utilizado para medir el pH fue el pHmetro 744 pH-meter – METROHM y para adicionar NH₄OH un 775 Dosimat – METROHM.

Una vez obtenidas las suspensiones coloidales individuales, se mezclaron ordenadamente partiendo de la que presenta menor valor de pH, la de Zn, y adicionando posteriormente las de mayores valores. Para el mezclado se

utilizó inicialmente un agitador y luego se sometió la mezcla a la acción de un equipo de alta cizalla, ultraturrax (IKA T-50), durante 10 minutos, para garantizar una distribución uniforme de los constituyentes y poca aglomeración de las partículas coloidales. La suspensión se dejó envejecer durante un día y luego se filtró; el sólido húmedo que se obtuvo se volvió a redispersar en agua destilada. Este proceso, denominado de lavado, se repitió tres veces.

Posteriormente, el sólido húmedo obtenido al finalizar el lavado se secó a 60°C, durante 24 horas, y se maceró hasta obtener un polvo muy fino. En la tabla 1 se indican las composiciones de los polvos cerámicos obtenidos.

Para distinguir adecuadamente las muestras que se estudiaron se utilizó la siguiente notación: P#LN°TN°, donde # indica las concentraciones molares utilizadas, tabla 1, y LN° y TN° las condiciones señaladas en las siguientes tablas:

Referencia para lavados

| LN° | Lavados |
|-----|-----------|
| L0 | 0 Lavados |
| L1 | 1 Lavado |
| L2 | 2 Lavados |
| L3 | 3 Lavados |

Referencia para tratamientos térmicos

| TN° | Temperatura |
|------|-------------|
| T2 | 200°C |
| T2.5 | 250°C |
| T3 | 300°C |
| T3.5 | 350°C |
| T4 | 400°C |
| T4.5 | 450°C |
| T5 | 500°C |
| T5.5 | 550°C |

2.2. Caracterización de los polvos cerámicos obtenidos

Para determinar lo que ocurre con los grupos funcionales presentes en los sistemas, en cada una de las diferentes etapas del proceso de síntesis de los polvos cerámicos de Zn – Bi- Sb – La – Al, se utilizó espectroscopia infrarroja. Para ello se empleó el espectrómetro IR 2000 – Termo Electron Corporation.

Para conocer cómo evolucionan las fases cristalinas de los sólidos, al someterlos a los diferentes procesos que conducen a la síntesis de la materia prima, para conformar

los varistores, se utilizó DRX. El equipo empleado fue un difractor SIEMENS D-5000.

Para determinar a que temperatura ocurren las principales reacciones exotérmicas y endotérmicas de los polvos cerámicos a los que no se les ha realizado ningún proceso de lavado ni tratamiento térmico especial, salvo el secado a 60°C, se utilizó análisis térmico diferencial.

2.3. Procesamiento cerámico y caracterización de los varistores

El conformado de las pastillas se realizó utilizando prensado uniaxial e isostático; con uniaxial se prensó a 20 Mpa y en prensado isostático a 230 MPa. Obtenidas las pastillas en verde se sinterizaron a 1200°C durante 2 horas a una velocidad de 5°C por minuto. Una vez conformadas la pastillas, estas se caracterizaron utilizando un equipo KEITHLEY-237 para obtener las curvas corriente-voltaje correspondientes.

3. Resultados y discusión

3.1. Valoración potenciométrica

Las curvas de valoración del acetato de cinc y del nitrato de aluminio no se muestran ya que ellas están ampliamente discutidas en la literatura (Ávila H.A., 2004 y Cobo J., 2005).

Las curvas de valoración potenciométrica del acetato de bismuto, para concentraciones de 0.5%, 1.0% y 1.5% en moles de Bi, se muestran en la figura 1.

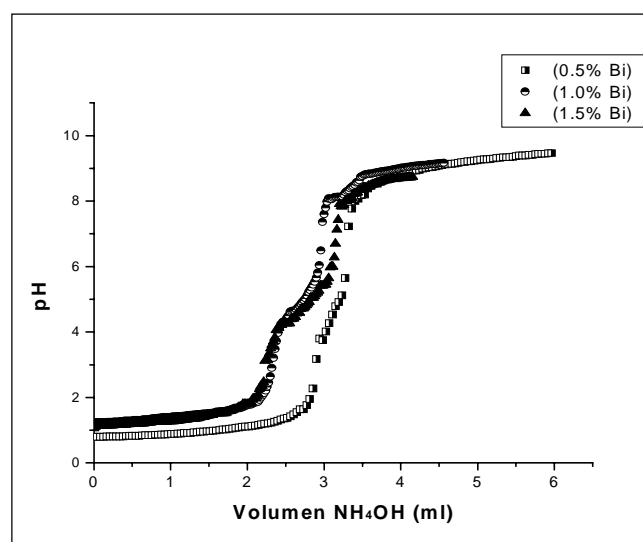


Figura 1. Curvas de valoración potenciométrica obtenidas para soluciones acuosas con diferentes concentraciones de bismuto.

Tabla 1. Porcentajes molares de los precursores, presentes en los sistemas a estudiar.

| REF. | % ZnO | % Al ₂ O ₃ | % Bi ₂ O ₃ | % Sb ₂ O ₃ | % LaO |
|------|-------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------|
| P1 | 98,3 | 0,2 | 0,5 | 1,0 | 0 |
| P2 | 97,3 | 0,2 | 0,5 | 2,0 | 0 |
| P3 | 97,8 | 0,2 | 1,0 | 1,0 | 0 |
| P4 | 96,8 | 0,2 | 1,0 | 2,0 | 0 |
| P5 | 99,25 | 0,2 | 0,5 | 0 | 0,05 |
| P6 | 99,1 | 0,2 | 0,5 | 0 | 0,2 |
| P7 | 98,75 | 0,2 | 1,0 | 0 | 0,05 |
| P8 | 98,6 | 0,2 | 1,0 | 0 | 0,2 |
| P9 | 98,25 | 0,2 | 0,5 | 1,0 | 0,05 |
| P10 | 98,1 | 0,2 | 0,5 | 1,0 | 0,2 |
| P11 | 97,25 | 0,2 | 0,5 | 2,0 | 0,05 |
| P12 | 97,1 | 0,2 | 0,5 | 2,0 | 0,2 |
| P13 | 97,75 | 0,2 | 1,0 | 1,0 | 0,05 |
| P14 | 97,6 | 0,2 | 1,0 | 1,0 | 0,2 |
| P15 | 96,75 | 0,2 | 1,0 | 2,0 | 0,05 |
| P16 | 96,6 | 0,2 | 1,0 | 2,0 | 0,2 |

En la figura 2 se indican las curvas de valoración potenciométrica obtenidas para soluciones acuosas que contenían diferentes concentraciones de lantano, 0.05 % y 0.2 % en moles de La.

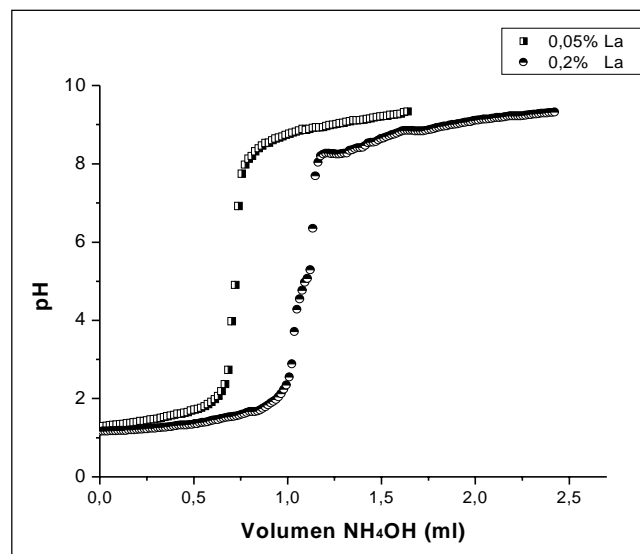
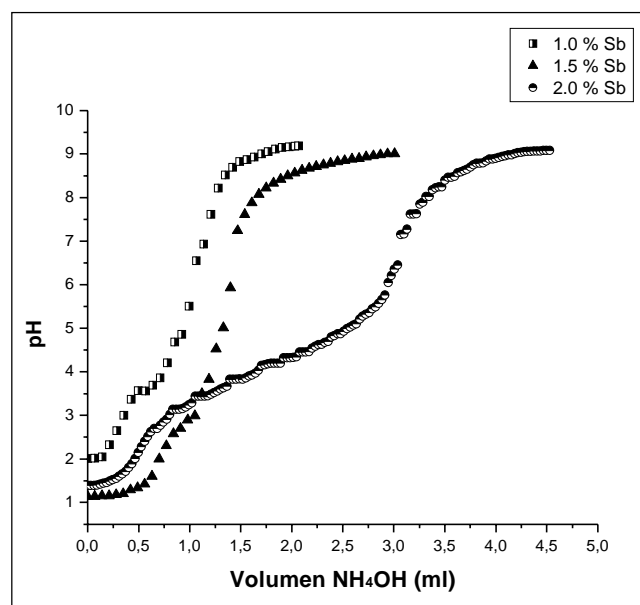
En la figura 3 se muestran las curvas de valoración potenciométrica obtenidas para soluciones con diferentes concentraciones de acetato de antimonio: 0.5%, 1.5% y 2.0% en moles de Sb.

Considerando de manera generalizada el comportamiento de los sistemas, representados en sus curvas de valoración potenciométrica correspondientes (figuras 1, 2 y 3), la primera zona donde la pendiente de la curva es pequeña, y presenta muy poca variación, representa reacciones que implican alto consumo de los OH⁻ suministrados por la base, por ejemplo en la neutralización de los iones H⁺ producidos por el ácido previamente disuelto o por las reacciones de hidrólisis de los complejos del catión que existen en el sistema. A medida que los OH⁻ suministrados por la base se consumen, se avanza en la formación de especies mononucleares y en el favorecimiento de la interacción de las mismas para conformar especies polinucleares a través de reacciones de policondensación: olación (formación de puentes OH) y/o oxolación (formación de puentes O) (Jolivet J., 2000).

Por otro lado, estas especies polinucleares comienzan a unirse para formar embriones que al alcanzar un tamaño crítico permiten consolidar los núcleos de la fase sólida. Estos procesos están indicados en las curvas de valoración potenciométrica por un cambio drástico de la pendiente. Cuando el pH empieza a aumentar, la existencia de núcleos en la suspensión se manifiesta visualmente a través del cambio que experimenta el sistema pasando de una solución transparente a una solución turbia y final-

mente a una suspensión viscosa, debido al aumento de la cantidad de núcleos. Al avanzar en la adición de la base, los núcleos crecen y en algunos sistemas se llega a formar un sedimento en el fondo del recipiente.

Una vez que la pendiente de la curva potenciométrica disminuye, a altos valores de pH, este parámetro varía


Figura 2. Curvas de valoración potenciométrica de las soluciones que contienen diferentes concentraciones de lantano.

Figura 3. Curvas de valoración potenciométricas correspondientes a soluciones acuosas con diferente concentración de antimonio.

muy poco permaneciendo prácticamente constante, el sistema se satura de OH^- y las partículas, o núcleos crecidos, comienzan a re-disolverse. En el caso concreto del sistema de Zn, si el sistema se lleva por encima de un pH de 8.2 se presenta la redisolución completa de la suspensión obteniéndose una solución totalmente transparente que estaría constituida por cincazos; lo anterior no ocurre en las suspensiones de los otros cationes empleados.

Es necesario aclarar que cada curva de valoración potenciométrica presenta características especiales, zonas donde ocurren cambios bruscos de pH o donde el pH permanece constante, que reflejan procesos fisicoquímicos propios y que están relacionados con la naturaleza de los cationes y aniones involucrados. Los valores de pH a los que se realizó la precipitación de cada uno de los cationes fueron: 8,3 para el Zn, 8,8 el Bi, el Sb a 9,0, el Al a 9,2 y el La a 9,0.

3.2. Espectroscopia Infrarroja (FTIR)

En la figura 4 se muestran los espectros FTIR de los sólidos obtenidos después de adicionar NH_4OH a los sistemas con diferentes concentraciones de antimonio (Sb), sin lantano (La), y que no fueron sometidos al proceso de lavado con agua.

Como se puede observar, los espectros correspondientes a las muestras P1L0 y P2L0 no presentan grandes variaciones. Son evidentes las bandas correspondientes al grupo carboxilo COO^- , alrededor de los 1500 cm^{-1} , y a los OH^- , banda centrada en 3430 cm^{-1} . Algo similar ocurre con las muestras que contienen diferentes concentraciones de bismuto, (figura 5). Estos espectros presentan sutiles diferencias en el rango de los 1000 a 400 cm^{-1} con relación a la figura 4. En la tabla 2 se resume la asignación de bandas correspondientes a los espectros de las figuras 4 y 5.

En la figura 6 se ilustran los espectros FTIR correspondientes a muestras con diferente concentración de lantano (La), sin antimonio (Sb), y que no fueron sometidas al proceso de lavado con agua. No se presentan grandes cambios entre estos espectros y los que se muestran en las figuras anteriores por lo que la asignación de bandas, que se resume en la tabla 2, es válida para el espectro de la figura 6.

Otro parámetro importante durante el proceso de síntesis de la materia prima es la temperatura. En las figuras 7 y 8 se muestran los espectros FTIR de sólidos con diferentes concentraciones de antimonio que fueron sometidos a diferentes tratamientos térmicos. Las variaciones más notorias se presentan en el intervalo entre 1000 y 400 cm^{-1} donde es evidente el fortalecimiento del enlace $\text{Zn} - \text{O}$

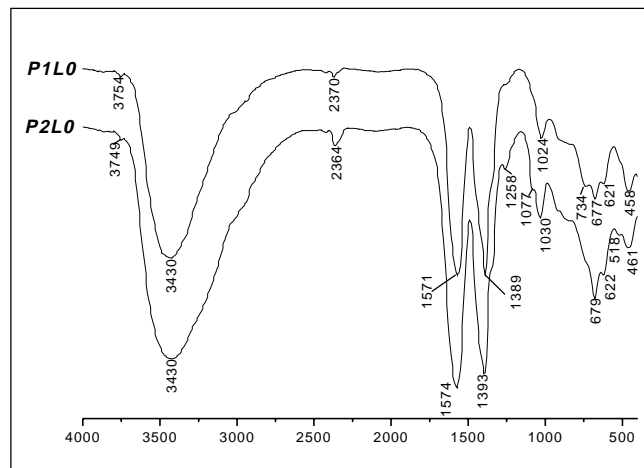


Figura 4. Espectros de FTIR de muestras del sistema Zn-Bi-Al-Sb-La que contienen diferentes concentraciones de Sb, sin La, y que no se sometieron al proceso de lavado.

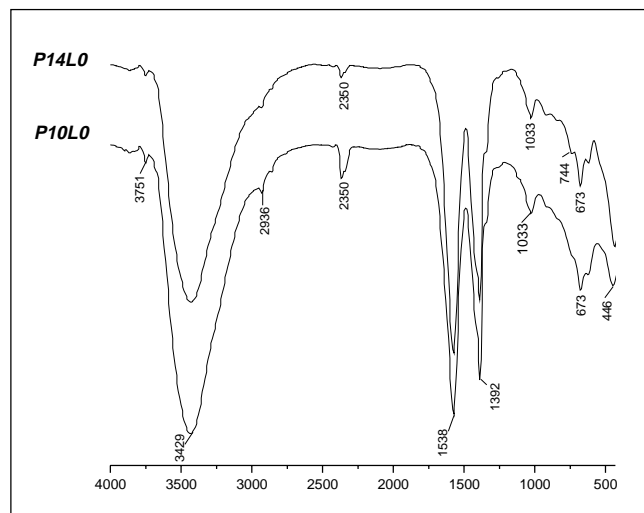


Figura 5. Espectros de FTIR de muestras del sistema Zn-Bi-Al-Sb-La que contienen diferentes concentraciones de Bi en presencia de La y Sb y que no se sometieron a procesos de lavado.

indicado por el incremento de la intensidad de la banda a 478 cm^{-1} , representativa de este enlace. Aún a la temperatura de 250°C sigue presente el grupo COO^- ; pareja de bandas alrededor de 1500 cm^{-1} con una diferencia de $\Delta\nu = 182$ indicando que el grupo carboxilo está formando un complejo bidentado, muy probablemente, tipo puente. A la temperatura de 450°C se observan principalmente las bandas correspondientes al ZnO .

Cuando el sólido se somete al proceso de lavado, y luego a tratamientos térmicos, los espectros presentan

Tabla 2. Asignación de grupos funcionales a las bandas correspondientes a muestras donde varía la concentración de antimonio o bismuto (muestras sin lavado).

| P1LO (Zn-Bi-Al-Sb) Sin lavado | | | | P2LO (Zn-Bi-Al-Sb) Sin lavado | | | | P3LO (Zn-Bi-Al-Sb) Sin lavado | | | | Grupos funcionales (modos vibracionales) |
|----------------------------------|--|--|--|----------------------------------|--|--|--|----------------------------------|--|--|--|---|
| ZnO 98,3% | Al ₂ O ₃ 0,2% | Bi ₂ O ₃ 0,5% | Sb ₂ O ₃ 1,0% | ZnO 97,3% | Al ₂ O ₃ 0,2% | Bi ₂ O ₃ 0,5% | Sb ₂ O ₃ 2,0% | ZnO 97,8% | Al ₂ O ₃ 0,2% | Bi ₂ O ₃ 1,0% | Sb ₂ O ₃ 1,0% | |
| 3754 | | | | 3750 | | | | 3749 | | | | |
| 3431 | | | | 3429 | | | | 3432 | | | | v (OH) y H-O-H |
| Hombro "3050" | | | | Hombro "3050" | | | | ----- | | | | H-O-H v _a (CH ₂) |
| 2941 | | | | ----- | | | | ----- | | | | (-CH ₂ OH) ₂ tensión grupo CH2 v _s (CH) y v (CH) |
| ----- | | | | ----- | | | | Hombro "2420" | | | | v (OH) |
| ----- | | | | ----- | | | | Hombro "2380" | | | | ?? |
| 2370 | | | | ----- | | | | ----- | | | | ?? |
| ----- | | | | 2364 | | | | ----- | | | | ?? |
| 1571 | | | | 1574 | | | | 1573 | | | | v _{as} (COO) |
| 1389 | | | | 1393 | | | | 1387 | | | | NO ₃ y Bending del OH y v _s (COO) |
| ----- | | | | Hombro "1350" | | | | ----- | | | | δ _t (CH3) |
| 1259 | | | | 1258 | | | | ----- | | | | |
| ----- | | | | 1077 | | | | ----- | | | | CH2-CH2 sim. N=O |
| ----- | | | | 1030 | | | | ----- | | | | CH2-CH2 antis. Modo tensión simétrico O-C-C-O N=O |
| 1024 | | | | ----- | | | | 1023 | | | | p (CH3) |
| ----- | | | | Hombro "910" | | | | 912 | | | | v (CC) |
| Hombro "900" | | | | ----- | | | | ----- | | | | Rocking CH2-CH2 y tensión C-O |
| ----- | | | | 847 | | | | ----- | | | | Vib. Hib. del C-C y C-O |
| 836 | | | | ----- | | | | 833 | | | | NO ₃ |
| ----- | | | | Hombro "760" | | | | ----- | | | | Al - OH |
| 734 | | | | ----- | | | | ----- | | | | ?? |
| ----- | | | | ----- | | | | Hombro "700" | | | | ?? |
| 677 | | | | 679 | | | | 677 | | | | δ (COO) |
| 621 | | | | 622 | | | | 622 | | | | Π (COO)/ Π (CH) δ (COO) Al-O |
| Hombro "520" | | | | 518 | | | | ----- | | | | Defor. Esqueletal etilenglicol v (Zn-O) |
| 458 | | | | 461 | | | | ----- | | | | δ (C-C) |
| ----- | | | | ----- | | | | 446 | | | | ?? |

bandas muy parecidas a las anteriores y el comportamiento es similar tal como se puede observar en la figura 9.

3.3. Análisis térmico

En la figura 10 se muestran las curvas de ATD correspondientes a muestras sin lantano, P1L0, sin antimonio,

P6L0, y a una que contenía tanto lantano como antimonio, P10L0.

El pico endotérmico entre 100 y 200°C debe corresponder a la pérdida de agua por parte de la muestra tanto adsorbida como de cristalización. Los sólidos que contienen lantano presentan un pico exotérmico a ~ 300°C que

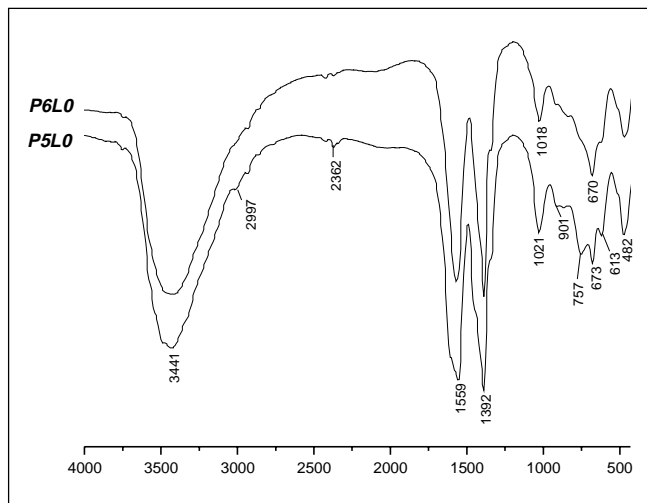


Figura 6. Espectros de FTIR de muestras que contienen diferentes concentraciones de La, sin Sb, y que no se sometieron al proceso de lavado.

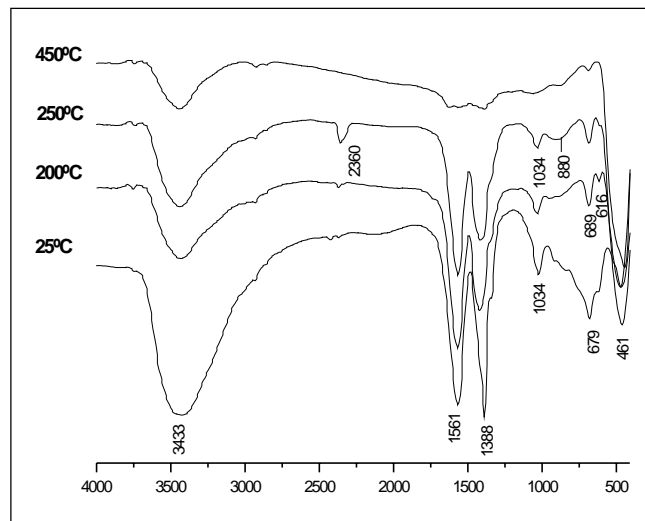


Figura 8. Espectros correspondientes a una muestra del sistema Zn-Bi-Al-Sb-La que contiene 1% en moles de Sb_2O_3 (P10L0), con una composición similar a la muestra anterior, y que se sometió a diferentes tratamientos térmicos.

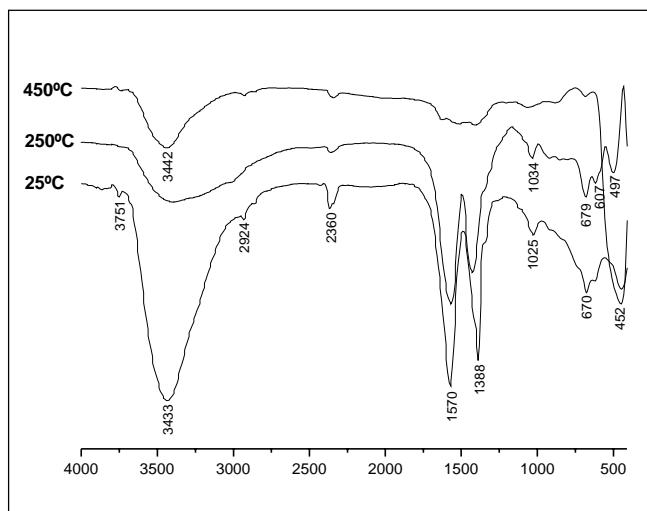


Figura 7. Espectros correspondientes a una muestra del sistema Zn-Bi-Al-Sb-La sin Sb_2O_3 (P6L0) y que fue sometida a diferentes tratamientos térmicos.

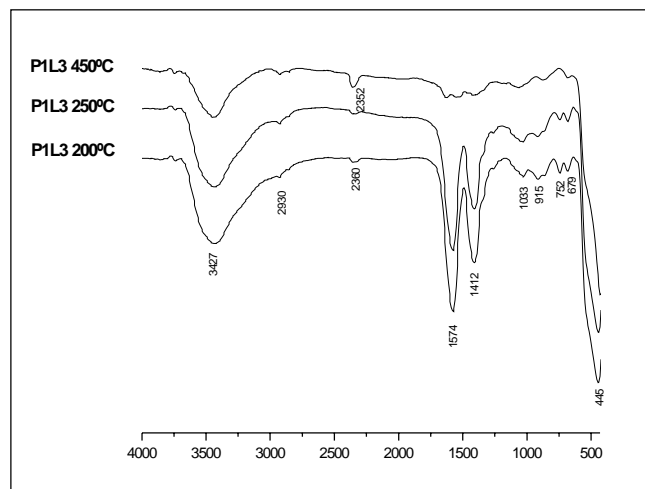


Figura 9. Espectros de FTIR de una muestra del sistema Zn-Bi-Al-Sb-La que contenía 1% en moles de Sb_2O_3 (P1L3), sin La, lavadas tres veces con agua, y sometidas a diferentes tratamientos térmicos.

se puede asociar a la descomposición de la parte orgánica de los complejos de este catión, con desprendimiento de CO_2 , y a la cristalización del óxido de lantano. El otro pico exotérmico, que ocurre cerca a los 350°C , debe representar la oxidación de la parte orgánica de los compuestos de los otros cationes, Zn – Bi y Sb, así como a la conformación de sus óxidos. Para precisar más lo enunciado habría que realizar un estudio de rayos X a muestras tratadas térmicamente a ciertas temperaturas entre 150 y 400°C , antes y después de que ocurran los picos.

Otra variación importante en las curvas de ATD es el cambio de pendiente de la línea de base, bastante apreciable por encima de los $\sim 750^\circ\text{C}$, y que pone en evidencia la sinterización de las partículas favorecida por la formación de una fase líquida por parte del bismuto; el diagrama de fases del $\text{ZnO} - \text{Bi}_2\text{O}_3$ presenta un eutéctico aproximadamente a esta temperatura (Guha J.P. *et al.* 2004).

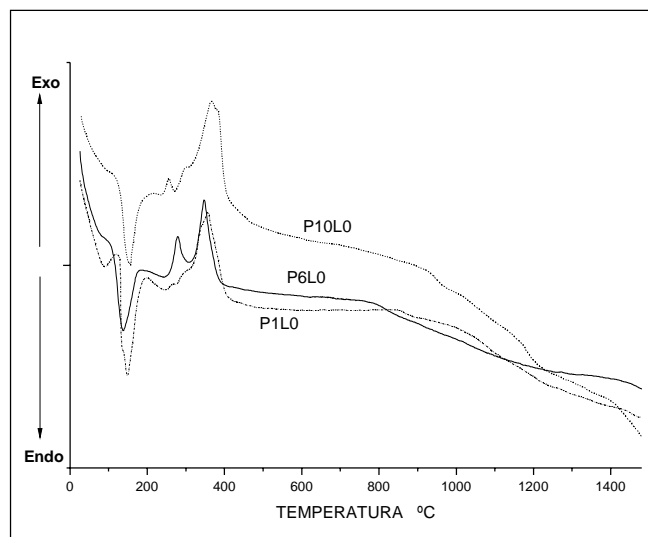


Figura 10. Curvas de ATD correspondientes a muestras que contienen Sb pero no La, P1L0, La pero no Sb, P6L0, y tanto La como Sb, P10L0.

3.4. Difracción de Rayos X (DRX)

La figura 11 muestra los difractogramas de rayos x de una muestra P1 lavada tres veces con agua, P1L3, y luego sometida a un tratamiento térmico a 300°C durante 5 minutos, P1L3T3. La fase cristalina más importante en la muestra P1L3 es la cincita, ZnO y aparecen algunos compuestos de Bi, Sb y/o La. Estas fases cristalinas no están bien cristalizadas como lo indican los picos anchos, y el gran ruido de fondo, que aparecen en el difractograma.

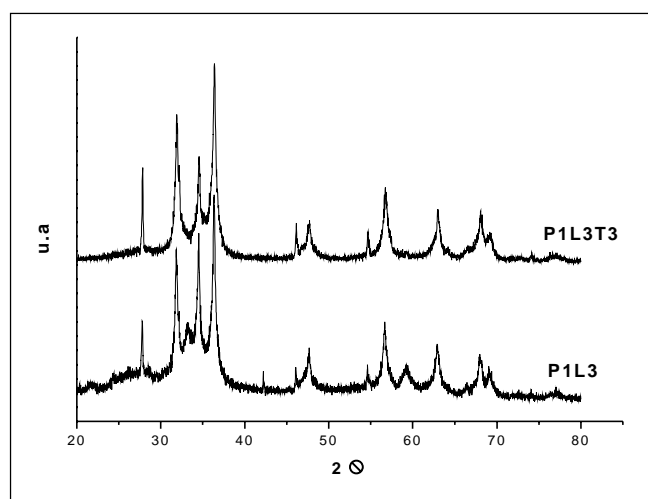


Figura 11. Difractogramas de rayos x de muestras que contiene Sb, y no La, sometida a tres (3) lavados (P1L3) y luego tratada térmicamente a 300°C durante 5 minutos (P1L3T3).

Después de someter la muestra al tratamiento térmico (P1L3T3) sigue la cincita siendo la fase cristalina más importante, desaparecen algunos compuestos como Bi_2O_3 (PDF 41-1449) y Al_2O_3 (PDF 02-0921) pero no aumenta el grado de cristalización de la muestra.

Los difractogramas correspondientes a las otras muestras estudiadas son similares al de la figura 11. Para las muestras tratadas a 500°C, (figura 12), la única fase cristalina presente es el ZnO corroborando los resultados de espectroscopía, (figuras 7 y 8), donde aparecen principalmente las bandas del ZnO, y de ATD, (figura 10) donde el último pico exotérmico ocurre a 400°C.

Tabla 3. Fases cristalinas presentes en los difractogramas P1L3, P1L3T3 y P1L3T5.

| Muestra | Fases presentes | PDF |
|---------------------|-------------------------|---------------|
| P1L3 Y P1L3T3 | Sb_2O_3 | (PDF 42-1466) |
| | Bi_2O_3 | (PDF 41-1449) |
| | Al_2O_3 | (PDF 02-0921) |
| | Al_2O_3 | (PDF 46-1215) |
| P1L3T5 | Sb_2O_3 | (PDF 42-1466) |
| | Al_2O_3 | (PDF 46-1215) |

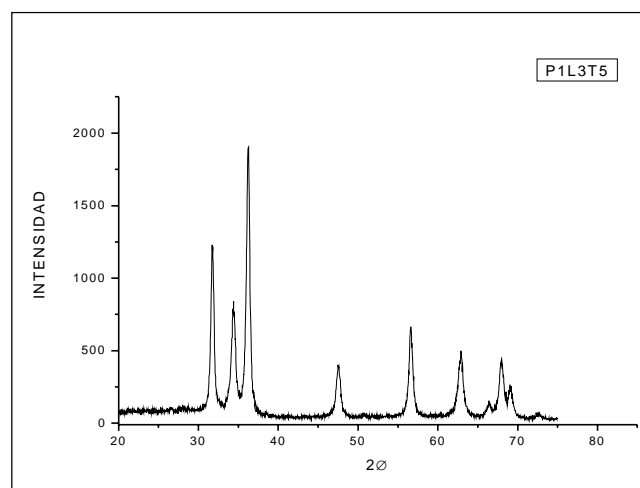


Figura 12. Difractograma de rayos X que corresponde a la muestra P1L3 tratada a 500°C.

3.5. Caracterización Eléctrica y Microestructural del Varistor

En la figura 13 se muestran las curvas I-V correspondientes a la muestra P1L3T3 sinterizada a 1200°C durante-

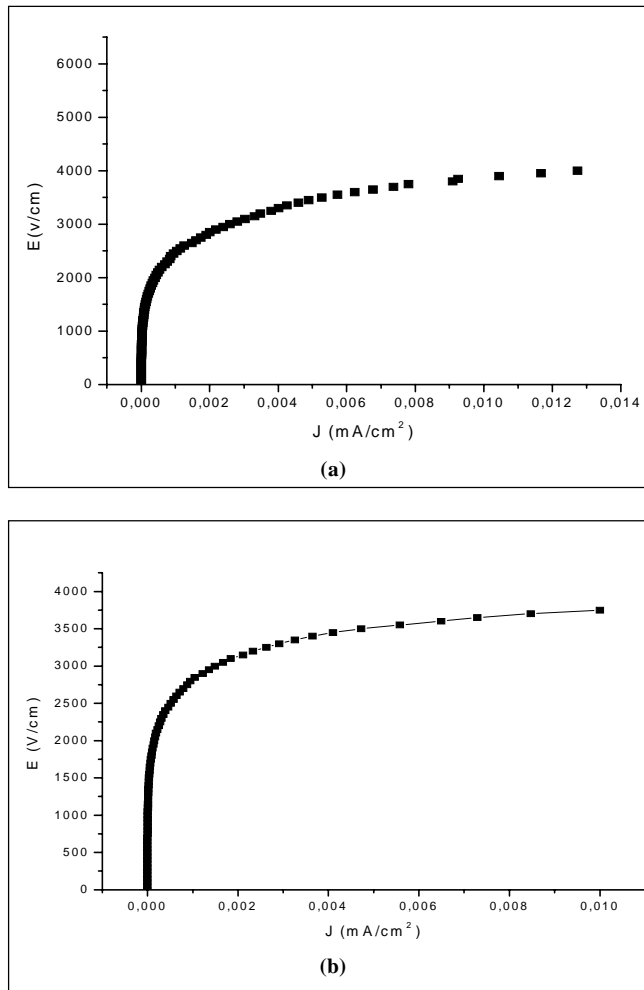


Figura 13. Curvas I-V correspondientes a la muestra P1L3T3 sinterizada a 1200°C durante 2 horas y que fue prensada (a) uniaxialmente y (b) isostáticamente.

2 horas a una velocidad de 5° por minuto y prensadas uniaxial, a 20MPa, e isostáticamente a 210 MPa. En la tabla 4 se resumen las características eléctricas más importantes de este dispositivo.

De acuerdo con los resultados, el mejor comportamiento se obtiene para el material prensado isostáticamente ya

Tabla 4. Características eléctricas de la muestra P1L3T3 sinterizada a 1200°C y prensada de manera diferente: uniaxial e isostáticamente.

| Muestra | α | E_r (V/cm) | I (mA) |
|---------------------|----------|--------------|-----------------------|
| P1L3T3 (uniaxial) | 5,0 | 4.000 | $6,78 \times 10^{-3}$ |
| P1L3T3 (isostática) | 7,5 | 3.750 | $7,14 \times 10^{-3}$ |

que ello permite una mayor densidad de la muestra en verde y mejor disposición de las partículas, lo que favorece la densificación de la muestra sinterizada y por lo tanto mejores propiedades. En la figura 14 se muestra la microestructura de la muestra P1L3T3 sinterizada a 1200°C y prensada isostáticamente. En ellas es evidente una alta porosidad que justifica el bajo valor medido de la densidad de la muestra sinterizada, un ~ 90% de la densidad teórica, y el crecimiento anormal de algunos de los granos.

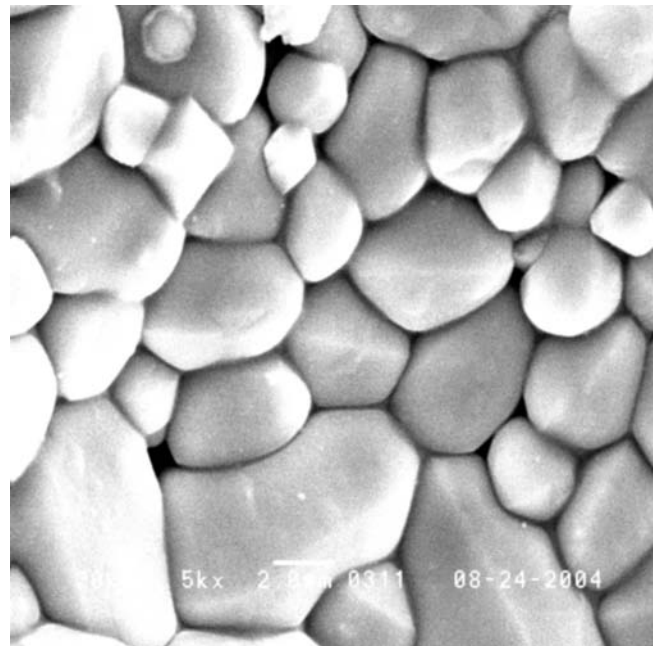


Figura 14. fotografía obtenida con MEB de la microestructura de la muestra P1L3T3, sinterizada a 1200°C y prensada a 210 MPa.

4. Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos en este trabajo se puede concluir lo siguiente:

- El método de síntesis desarrollado permitió la obtención de polvos cerámicos que al conformarlos, prensarlos y sinterizarlos, dieron dispositivos que presentaron características varistoras. El método utilizado es sencillo y permite garantizar su reproducibilidad por el control que se tiene sobre el mismo a través de las curvas de valoración potenciométrica.
- El ion acetato que se encuentra en los precursores de varios de los cationes, utilizados para conformar el sistema Zn-Bi-Al-Sb-La, está presente en las mues-

tras hasta temperaturas de $\sim 400^{\circ}\text{C}$. A temperaturas mayores se elimina el acetato que existe en las muestras y quedan los óxidos como fases únicas en la muestra, predominando el ZnO.

- Durante el tratamiento térmico de las muestras sólidas, obtenidas de la mezcla de las suspensiones de los diferentes cationes, se presentan fenómenos de pérdida de agua, oxidación de parte orgánica, conformación de los óxidos y a partir de los $\sim 750^{\circ}\text{C}$, la sinterización en presencia de fase líquida de las partículas del polvo cerámico.
- Aunque los sistemas estudiados presentaron comportamiento varistor, es necesario mejorar sus propiedades eléctricas reduciendo la porosidad, controlando el crecimiento de grano y las fases secundarias presentes en las muestras sinterizadas.

5. Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el proyecto COLCIENCIAS código 1103-05-11507.

Agradecimientos especiales al Sr. A. Mosquera, por la toma de los datos de las curvas I-V y las fotografías de M.E.B. y a la V.R.I. de la Unicauca por su apoyo administrativo.

6. Bibliografía

- Ávila, H.A.** 2004, "Síntesis y caracterización de polvos cerámicos del sistema Zn-Pr-Co obtenidos a través de los métodos co-precipitación y precursor polimérico" Trabajo de grado, Univesidad del Cauca.
- Clarke D.R.** 1999, "Varistors Ceramics", J. Am. Ceram. Soc., **82** [3], 485-502.
- Cobo J.** 2005, estudio de la síntesis de alúmina por el método de precipitación controlada (MPC), Trabajo de Grado, Universidad del Cauca.

Cruz, A.M. 2003, "Obtención de varistores del sistema cinc praseodimio cobalto" Trabajo de grado, Universidad del Cauca.

Guha J.P. , Kunaj S. Suvorov D. 2004, "Phase equilibrium relations in the binary system. $\text{Bi}_2\text{O}_3 - \text{ZnO}$ ", J. Mater. Sci. **39** [3], 911-918.

Gupta T. K. 1990, "Application of Zinc Oxide Varistors". J. Am. Ceram. Soc., **73** [7], 1817 – 1840.

Haile S.M. , Johnson D.W. , Wiseman G.H. , Bowen H.K. 1989, "Aqueous precipitation of spherical zinc oxide powders for varistor applications", J.Am. Ceram. Soc., **72** [10], 2004 – 2008.

Harnden J.D., F.D. Martzloff, W.G. Morris, F.G. Golden,1972, "Metal-oxide varistor: a new way to suppress transients", Electronics-Technical articles.

Hower P.L. , Gupta T.K. , 1979, "A barrie model for ZnO varistors", J. Appl. Phys. **50**, 4547-4855.

Jolivet J. 2000, Metal oxide chemistry and synthesis, Jhon Wiley R. Sons, LTD.

Lessing P.A., 1989, "Mixed-Cation Oxide Powders viapolymeric precursors", Am. Ceram. Soc. Bull. **68** [5], 1002-1007.

Levinson L.M., Philipp H.R., 1986, "Zinc Oxide Varistors" - A Review, Ceramic Bulletin, **65** [4], 639-646.

Lionel M. Levinson 1988, "Electronic Ceramics: Propierties, Devices, and Applications", General Electric Company. Schenectady, New York.

Matsuoka M., 1971, "Nonohmic Properties of Zinc Oxide Ceramics", Jpn. J. Appl. Phys. **10** [6] 736-746.

Richard Einzinger, 1987, "Metal Oxide Varistors" Mater. Sci.,**17**, 299-32.

Sheng Y., Yan T., Chen L. 2000, Analysis of ZnO prepared by sol-gel method, ceram. Int. **26**, 733-737.

Vidal, K.A. 2003, "Determinación de complejos intermedios cinc en el sistema Zn $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{-NH}_4\text{OH-H}_2\text{O}$ durante la síntesis de ZnO", Trabajo de grado, Universidad del Cauca.

Recibido el 24 de octubre de 2005.

Aceptado para su publicación el 10 de abril de 2006.

ANÁLISIS DE LA MICROPOROSIDAD DE CATALIZADORES DE FCC

por

Yazmín Y. Agámez Pertuz*¹, Luis A. Oviedo Aguiar¹, Uriel Navarro Uribe², Miguel A. Centeno³ & José A. Odriozola³

Resumen

Agámez Pertuz Y., L.A. Oviedo, U. Navarro, M.A. Centeno & J.A. Odriozola: Análisis de la microporosidad de catalizadores de FCC microporosity análisis of FCC catalysts. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **30** (115): 271-278. 2006. ISSN 0370-3908.

La zeolita Y es un sólido microporoso que se utiliza como componente activo del catalizador en el proceso de ruptura catalítica. Se estudiaron las propiedades texturales de una zeolita comercial USY lixiviada y de una serie de catalizadores con 25, 35 y 45% de zeolita frescos y tratados a 1033 K durante 16 h con 20% de vapor de agua. Las muestras se caracterizaron por fisisorción de nitrógeno a 77 K y a partir de las isothermas obtenidas se determinó el volumen de microporo, el área externa y el área total de superficie aplicando el método de la curva - t y el modelo de Dubinin - Radushkevich (DR) con lo que se logró una combinación de las dos teorías para establecer una metodología válida para la evaluación de la microporosidad (ultra- y supermicroporos) y de la mesoporosidad. Se encontraron correlaciones entre el volumen de microporo calculado por la curva - t y el determinado por el modelo DR para los materiales frescos y tratados hidrotérmicamente.

Palabras clave: zeolita USY, adsorción de N₂, textura, volumen de microporo, área externa.

Abstract

Y Zeolite is a microporous solid which is used as active component of the catalyst for cracking catalytic process. The textural properties of a commercial USY zeolite leached and of a set catalyst with 25, 35 and 45% of zeolite fresh and treated at 1033 K in a 20% steam during 16 h were showed. Samples were characterized by nitrogen adsorption at 77 K; from the isotherms were determined micropore volume, micropore area, external surface area and total surface area by using t-plots and Dubinin-Radushkevich methods. A combination of the two theories was obtained in order to establish a valid methodology for evaluating microporosity (ultra- and supermicropore) and mesoporosity. The results indicate that quantitative correlations exist between micropore volume calculated by t-plot and the determined by DR model for fresh and hydrothermally treated materials.

Key words: USY zeolite, N₂ adsorption, texture, micropore volume, external surface.

¹ Dpto. Química, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

² ECOPELROL-Instituto Colombiano del Petróleo, Piedecuesta, Santander, Colombia.

³ Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla. Centro Mixto CSIC-Universidad de Sevilla. Avda. Americo Vespucio s/n. 41092 Sevilla. España.

* A quien se debe dirigir la correspondencia: Correo electrónico: yazya23@yahoo.es

Introducción

El catalizador de FCC es un material complejo conformado por zeolita – Y dispersa en una matriz constituida por diversos aditivos que hacen difícil el proceso de caracterización, de evaluación, de selección, de escalamiento y de predicción de su comportamiento catalítico en las condiciones reales del proceso. La zeolita Y es un aluminosilicato cristalino y microporoso constituido por tetraedros de $[\text{SiO}_4]^{4-}$ y $[\text{AlO}_4]^{5-}$ coordinados a través de puentes de oxígeno no lineales que posee un sistema de poro grande conectado a través de ventanas de diámetro de 0,8 nm y un sistema de poro (pequeño) de diámetro de 0,2 nm. Por estas propiedades y por la combinación de la acidez, de la estabilidad y de la textura es actualmente el corazón de los catalizadores de craqueo catalítico (Humphries, 1993; Avidan, 1993; Scherzer, 1991; Tonetto, 2004; Horniakova, 2001).

En las condiciones de desempeño normal del proceso de ruptura catalítica, el catalizador experimenta tratamientos rigurosos en el regenerador que modifican su comportamiento ya que el vapor de agua a altas temperaturas dealumina la estructura de la zeolita – Y con la consecuente destrucción de microporosidad, generación de material amorfo y pérdida de actividad, por lo que la determinación de los cambios en la porosidad de la fase activa durante el proceso catalítico es fundamental para la evaluación de la actividad y de la estabilidad del catalizador.

La determinación de las propiedades texturales de una zeolita o de un material que contiene microporos, donde no es aplicable la teoría BET, implica la utilización de la fisiadsorción de nitrógeno a 77 K a presiones relativas muy bajas y la selección de métodos de cálculo adecuados para que el tratamiento de los datos conduzcan a resultados confiables. En el caso de sólidos microporosos, De Boer *et al.* (1965) y Lippens *et al.* (1965) desarrollaron el método de la curva – t para la determinación del área de microporo como la diferencia entre el área total y el área de los poros grandes; asumiendo este planteamiento, Sing (1968) propuso el método de extrapolación a $t = 0$ de la parte lineal de la curva V_L en función de t , donde el intercepto es el volumen total de microporo y la pendiente es proporcional al área externa. Como la composición química de la superficie afecta el valor del espesor estadístico de la capa adsorbida (Storck, 1998), es importante calcularlo con referencia a un sólido no poroso, de composición y características químicas similares al material que se investiga.

En el presente estudio se muestra una metodología novedosa para evaluar confiablemente la microporosidad

de catalizadores de FCC, con base en la determinación del volumen de microporo por la curva – t y el modelo de Dubinin – Radushkevich (DR). Además, se encontró que el mejor procedimiento para calcular el espesor estadístico de capa adsorbida es cuando se utiliza como referencia la sílice hidroxilada no porosa estudiada por Carruthers *et al.* (1968) porque permite evaluar apropiadamente la microporosidad (ultra y supermicroporos) de las zeolitas comerciales y de los catalizadores frescos y tratados. De otra parte, se prueba que las correlaciones empíricas propuestas en la literatura (Raatz *et al.* 1987) se cumplen para materiales dealuminizados por lixiviación con HCl y desactivados por tratamiento hidrotérmico que simula las condiciones del regenerador.

Parte experimental

Materiales. La zeolita USY W.R. Grace Davidson (ZY) se lixivió con ácido clorhídrico 0,01N y 0,1N a 303 K durante 2 horas y a 333 K durante 4 horas respectivamente; en cada caso los sólidos resultantes se denominaron ZY1 y ZY2. El clorhidróxido de aluminio utilizado es un Clorhidrol Reheis Inc. en polvo con 99,9% de pureza y el caolín clay fue suministrado por W.R. Grace Davidson. La composición química de estos materiales se determinó por espectroscopía de absorción atómica (AAS).

Preparación de catalizadores. Se seleccionó la zeolita lixiviada con ácido clorhídrico 0,01N (ZY1) para asegurar que sólo se removiera parte del aluminio no estructural y se preservara la estructura cristalina. Los catalizadores que contienen 25, 35 y 45% de zeolita ZY1 (ZY25, ZY35 y ZY45 respectivamente) se prepararon agregando a una solución con 10% de clorhidróxido de aluminio, la cantidad apropiada de caolín clay y con agitación (100 rpm) se adicionó el porcentaje requerido de zeolita. La suspensión resultante se homogenizó con ultrasonido durante 15 minutos y se extendió en un recipiente de superficie amplia para someterlo a un proceso cuidadoso de eliminación del solvente a 333 K durante 12 horas. El producto seco se maceró a un tamaño de partícula de 150 micras y se calentó por 1 hora a 373 K aplicando una rampa de calentamiento de 5 K min^{-1} y se calcinó a 773 K durante 12 horas con la misma velocidad de calentamiento. Una fracción de cada uno de estos catalizadores y de la zeolita ZY1 se desactivó hidrotérmicamente a 1033 K en un flujo de aire saturado con 20% de vapor de agua durante 16 horas. Los materiales resultantes se denominaron ZY25D, ZY35D, ZY45D y ZYD respectivamente.

Evaluación textural. Las isoterms de fisiadsorción de nitrógeno a 77 K se determinaron en un sortómetro Quantacrome Autosorb-1 equipado con un transductor que

alcanza una presión relativa de 10^{-6} para desgasificar las muestras a 573 K por 12 h, antes de la adsorción. El volumen de microporo se calculó aplicando dos metodologías distintas, la teoría de la curva $-t$ y la ecuación de Dubinin – Radushkevich (DR). Los valores de t se obtuvieron a partir de la ecuación de Halsey usando la presión relativa (P/P_0) registrada para cada isoterma y de la curva característica de una sílice hidroxilada no porosa reportada por Carruthers *et al.* (1968).

Resultados y discusión

Análisis químico. La composición química de la zeolita USY comercial, USY lixiviada, USY tratada hidrotérmicamente, del caolín y del clorhidrol se presenta en la tabla 1. Los valores descritos en esta tabla muestran una remoción de 6,4% y de 40,4% del aluminio de la zeolita USY fresca (ZY) cuando se lixivia con HCl 0,01N y 0,1N respectivamente. El valor encontrado para la relación Si/Al másica en la zeolita sin tratar y en las tratadas, es característico de este tipo de materiales y concuerda con los reportados en la literatura (Navarro, 2002; Scherzer, 1993). La relación $(\text{Si}/\text{Al})_{\text{AAS}}$ másica de la zeolita ZYD, como se esperaba, no cambia significativamente porque la extracción del aluminio por efecto del tratamiento hidrotérmico sólo ocurre a nivel estructural. El sólido utilizado como “matriz” es un caolín clay con un contenido de silicio y de aluminio atómico de 21,5 y de 39,4%

Tabla 1. Análisis químico de las materias primas para la preparación de los catalizadores

| Muestras | % Si | % Al | $(\text{Si}/\text{Al})_{\text{AAS}}$ |
|-------------|------|------|--------------------------------------|
| ZY | 36,8 | 10,9 | 3,4 |
| ZY1 | 35,7 | 10,2 | 3,5 |
| ZY2 | 35,9 | 6,5 | 5,5 |
| ZYD | 35,4 | 10,1 | 3,5 |
| Caolín clay | 21,5 | 39,4 | - |
| Clorhidrol | 23,7 | - | - |

respectivamente y el clorhidrol usado como ligante presenta un contenido de aluminio de 23,7% y de 44,7% como Al_2O_3 , valor que concuerda bien con el reportado por Reheis Inc.

Evaluación textural. En la figura 1 se presentan de manera comparativa las isotermas de adsorción de nitrógeno a 77 K de las zeolitas ZY, ZY1, ZY2 y las de los catalizadores sin tratar frente a las de la zeolita ZYD y de los catalizadores sometidos a tratamiento hidrotérmico. Estos resultados muestran que de acuerdo a la clasificación IUPAC y BDDT (Sing, 1985; Brunauer, 1940), todas las isotermas son de tipo I con condensación capilar para presiones relativas superiores a 0,90; característica de adsorbentes donde el llenado de los microporos determina la forma de la isoterma y es el responsable de la fuerte adsorción a bajas presiones relativas.

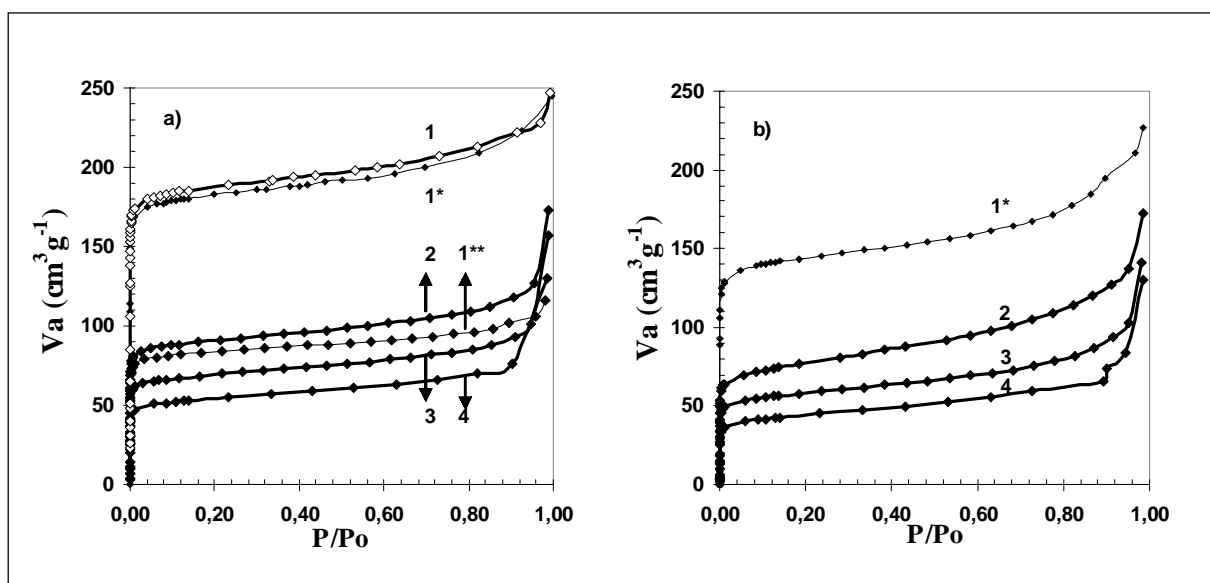


Figura 1. Isotermas de adsorción de nitrógeno a 77 K. a) Catalizadores frescos; b) Catalizadores tratados hidrotérmicamente; 1. ZY; 1*. ZY1; 1**. ZY2; 2. 45; 3. 35; 4. 25 % de zeolita.

La isoterma 1** de la figura 1a) pone en evidencia que el tratamiento con HCl 0,1N reduce la capacidad de adsorción de la zeolita en 54,9% para una presión relativa de 0,035; las isotermas 2, 3 y 4 muestran que el material no poroso contenido en los catalizadores frescos no influencia la forma de la isoterma de adsorción debido a que los mesoporos de la matriz y del ligante no contribuyen notablemente a la adsorción. De las isotermas de la figura 1b) se deduce que la desactivación hidrotérmica con 20% de vapor de agua a 1033 K no altera la forma de las isotermas pero produce modificaciones drásticas de todos los materiales que se reflejan en una pérdida de la capacidad de adsorción de 22,0% para la zeolita ZY1 y de 18,7; de 17,6 y de 12,0% para los catalizadores con 45, 35 y 25% respectivamente.

La microporosidad de las zeolitas y de los catalizadores se determinó a partir de la curva $-t$ utilizando la ecuación de Halsey (ecuación 1) para calcular el espesor estadístico de capa adsorbida cuya expresión general es

$$t = 3,54 \left[\frac{5,00}{\ln \frac{P_0}{P}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

Esta expresión es válida para el rango de presiones relativas donde la adsorción ocurre en multicapa y donde el valor 5,00 es empírico y el exponente 1/3 se deriva de la integración del potencial de Lennard-Jones (Leofanti, 1998).

A partir de las curvas $-t$ de la figura 2 de las zeolitas ZY1, ZY2, ZYD y de los catalizadores ZY35, ZY35D y ZY45 para valores de t^H entre 0,35 y 0,60 nm se calculó el volumen de microporo, el área externa y el área superficial total de acuerdo al método de Sing (1968). Como se ilustra en la curva 1 de esta figura, en este procedimiento se examina la recta $V_L = i + m * t$; entre $0,36 \leq t \leq 0,41$; donde el intercepto de la región lineal de la curva $-t$ representa el volumen total de microporo (V_{mp}^t) y la pendiente es proporcional al área superficial externa (S_{ext}). Los parámetros texturales derivados de esta metodología de todos los sólidos estudiados se presentan en la tabla 2, de donde se infiere que la mayor adsorción de nitrógeno ocurre en la parte microporosa de los sólidos, que el área externa es relativamente pequeña, que la contribución al área total es debida fundamentalmente al material microporoso y que la extracción del aluminio de la zeolita ZY2 se manifiesta en la reducción de 54,5% de la superficie microporosa.

El análisis de los parámetros texturales de la zeolita y de los catalizadores desactivados (tabla 2) pone en eviden-

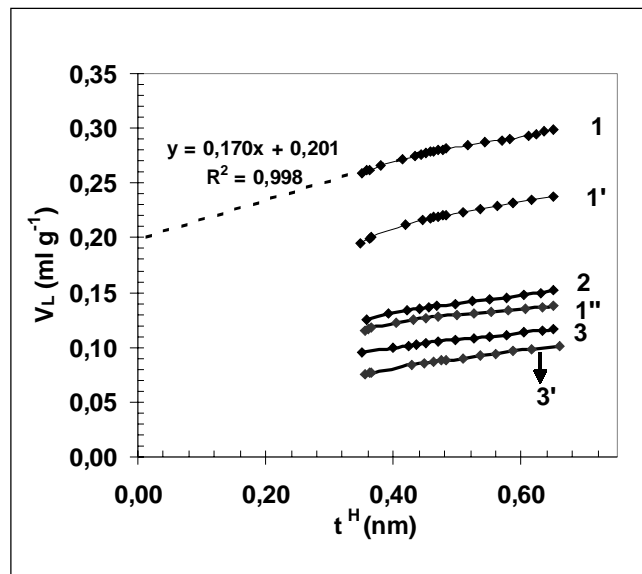


Figura 2. Curvas $-t$ calculadas con la ecuación de Halsey de: 1. ZY1; 1'. ZYD; 1''. ZY2; 2. ZY45; 3. ZY35 y 3'. ZY35D.

Tabla 2. Parámetros texturales de las zeolitas y de los catalizadores.

| Muestras | V_{mp}^t (ml g ⁻¹) | S_{ext}^t (m ² g ⁻¹) | S_{ext} (m ² g ⁻¹) | Stotal (m ² g ⁻¹) |
|----------|----------------------------------|---|---|--|
| ZY | 0,205 | 575,2 | 179,1 | 754,3 |
| ZY1 | 0,201 | 563,8 | 170,0 | 733,8 |
| ZY2 | 0,093 | 261,4 | 74,3 | 335,7 |
| ZYD | 0,157 | 440,6 | 133,1 | 573,7 |
| ZY25 | 0,047 | 132,0 | 72,5 | 204,5 |
| ZY35 | 0,072 | 201,9 | 69,3 | 271,2 |
| ZY45 | 0,096 | 269,2 | 88,9 | 358,1 |
| ZY25D | 0,030 | 83,9 | 75,0 | 158,9 |
| ZY35D | 0,045 | 126,3 | 87,2 | 213,5 |
| ZY45D | 0,055 | 154,3 | 125,0 | 279,3 |

cia que el tratamiento hidrotérmico conduce a una disminución del área microporosa de 134,6; 114,9; 75,6 y 48,1 m²g⁻¹ de los materiales ZY1, ZY45, ZY35 y ZY25 respectivamente pero no afecta considerablemente el valor del área externa debido a que la microporosidad destruida se convirtió en mesoporos de diámetro amplio con una leve capacidad de adsorción y en material amorfo con muy baja retención de nitrógeno a 77 K.

Para levantar la ambigüedad al seleccionar el rango lineal de aplicación del método de K. S. Sing (en las curvas $-t$ de la figura 2) cuando no es posible establecer un límite de coexistencia de micro- y mesoporosidad, se determinó el volumen de microporo a partir de la curva $-t$ de la figura 3 obtenida usando los valores de espesor

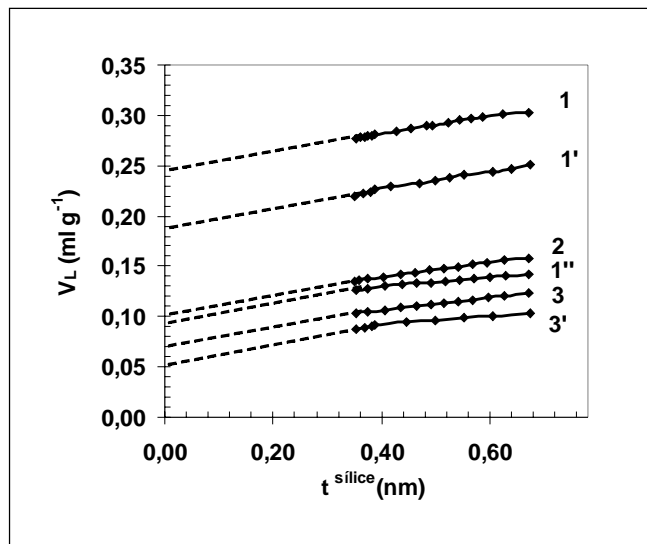


Figura 3. Curvas t calculadas con referencia a la sílice no porosa de: 1. ZY1; 1'. ZYD; 1''. ZY2; 2. ZY45; 3. ZY35 y 3'. ZY35D.

estadístico estimados con referencia a la curva característica de una sílice hidroxilada no porosa estudiada por Carruthers *et al.* (1968) de área superficial de $38,7 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$. Las gráficas de la figura 3 presentan la evolución de la retención de nitrógeno en función de los valores de t^{silice} de las zeolitas ZY1, ZY2, ZYD y de las mezclas catalíticas ZY35, ZY35D y ZY45, donde es evidente la importancia de escoger una referencia estándar adecuada para la interpretación de los datos experimentales; en este caso, se logró el desplazamiento de la región lineal hacia menores valores de t ($0,33 \leq t \leq 4,2$) cubriendo un rango mayor que el hallado aplicando la ecuación de Halsey.

El hecho de que la curva t para la zeolita y los catalizadores alcance la línea recta para valores de t^{silice} por encima de 0,33 indica que los microporos no se han llenado completamente a una presión relativa de $7 \cdot 10^{-2}$, por lo que se puede inferir que el llenado de mesoporos ocurre antes de que se termine el proceso de llenado de los microporos y en consecuencia la dificultad de separar la superficie micro- y mesoporosa.

Este comportamiento se observa para todos los sólidos estudiados donde es posible establecer con mayor precisión la zona de aplicación de la curva t y relleva la conveniencia de seleccionar un material de referencia no poroso para calcular el espesor estadístico y evaluar apropiadamente la microporosidad de los catalizadores en presencia de mesoporos. Es importante anotar que la mesoporosidad de las mezclas catalíticas proviene de la aportada por la zeolita y por el caolín clay y el clorhidrol.

Estos resultados muestran la importancia de este tipo de estudios para la caracterización de catalizadores comerciales que, como se conoce, están constituidos por el componente activo (zeolita) y por material no poroso porque demuestra la validez de la metodología seguida para establecer adecuadamente la caracterización textural de los microporos en los sólidos frescos y usados.

Las gráficas de la figura 4 muestran que para la misma presión relativa, el valor del espesor estadístico de la capa adsorbida encontrado a partir de la curva característica hallada con la ecuación de Halsey es mayor que el correspondiente hallado en la curva característica de la sílice no porosa. En los resultados obtenidos esta discrepancia

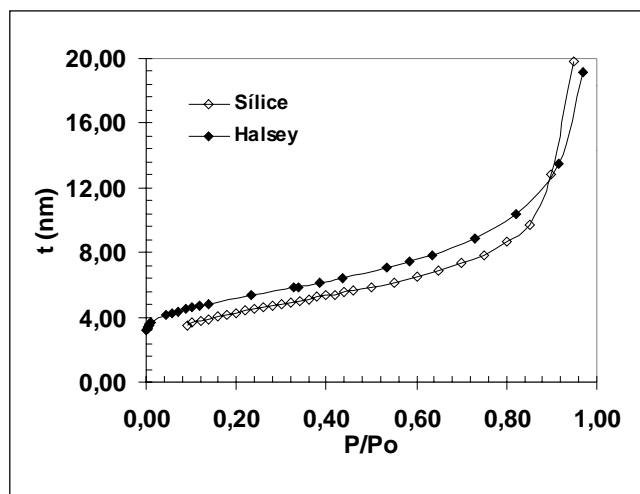


Figura 4. Curvas características de la sílice no porosa y de Halsey.

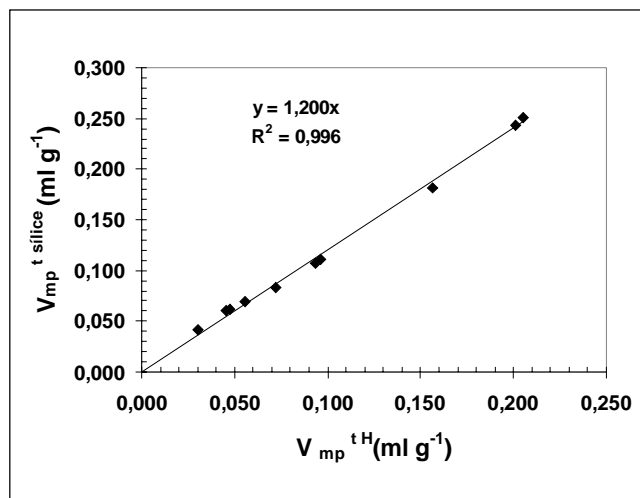


Figura 5. $V_{mp} t^{\text{silice}}$ en función de $V_{mp} t^H$.

se refleja en la figura 5 que relaciona el volumen de microporo calculado con referencia a la sílice no porosa en función del derivado de la curva $-t^H$, donde se observa una menor capacidad de adsorción de nitrógeno en los microporos cuando se utiliza el modelo de Halsey. De este resultado se infiere que para todos los materiales estudiados, independientemente del tratamiento, $V_{mp}^{t\text{ sílice}}$ es mayor que V_{mp}^{tH} en un factor de 1,2 y obedece a la ecuación:

$$V_{mp}^{t\text{ sílice}} = 1,200 * V_{mp}^{tH} \quad (2)$$

Debido a la restricción de la zona lineal de la curva $-t$ hacia presiones relativas más bajas para la cuantificación de la microporosidad se aplicó el modelo DR específico para materiales microporosos. La figura 6 se obtuvo al graficar, para cada muestra, el volumen adsorbido en el rango de presiones relativas comprendidas entre 10^{-6} a 10^{-1} de acuerdo a la ecuación de Dubinin-Radushkevich (DR):

$$\log V_a = \log V_{DR} - \log^2 (P_o/P) \quad (3)$$

Donde $\phi = (RT/\beta)^2$; V_a es el volumen adsorbido y V_{DR} es el volumen de microporo asumiendo que los poros se llenan con adsorbato líquido (Dubinin, 1981). En todos los casos, las gráficas DR presentan una zona lineal en el intervalo comprendido entre $3 < (\log^2 P_o/P) < 10$ y reproducen la recta propuesta por la ecuación (3) con una desviación para valores de $\log^2 P_o/P > 10$ que corresponden a presiones relativas menores que $7 * 10^{-4}$, lo cual es consistente con lo observado por Gregg *et al.* (1991). El intercepto de la región lineal se utilizó para calcular el

volumen total de microporo de las zeolitas y de los catalizadores frescos y desactivados hidrotérmicamente.

Es importante tener en cuenta que a pesar de que el modelo de Dubinin-Radushkevich fue desarrollado para materiales de porosidad homogénea, es aplicable para las zeolitas USY que, como se sabe, presenta al menos dos tipos de porosidad (Gregg *et al.* 1991).

En las figuras 7a y 7b se presentan, para todos los materiales tratados y sin modificar, correlaciones entre el volumen de microporo hallado a partir de la ecuación DR y los obtenidos usando los valores de espesor estadístico calculados con la ecuación de Halsey y con referencia a la sílice no porosa. Independiente del tratamiento aplicado a los sólidos, se encontraron correlaciones lineales del tipo:

$$V_{DR} = 0,02 + 1,30 * V_{mp}^{tH} \quad (4)$$

$$V_{DR} = 0,02 + 1,10 * V_{mp}^{t\text{ sílice}} \quad (5)$$

En ambos casos, el V_{DR} siempre es mayor porque el modelo de Dubinin - Radushkevich involucra un volumen (V_{mp}^u) que no es considerado por la curva t y que corresponde a la microporosidad de radio menor que 0,7 nm ($t < 0,35$ nm) o volumen de los ultramicroporos que se llenan a presiones relativas menores que $7 * 10^{-2}$. De esta manera para el volumen total de microporos calculado por la ecuación DR se puede plantear la expresión:

$$V_{DR} = V_{mp}^u + V_{mp}^s \quad (6)$$

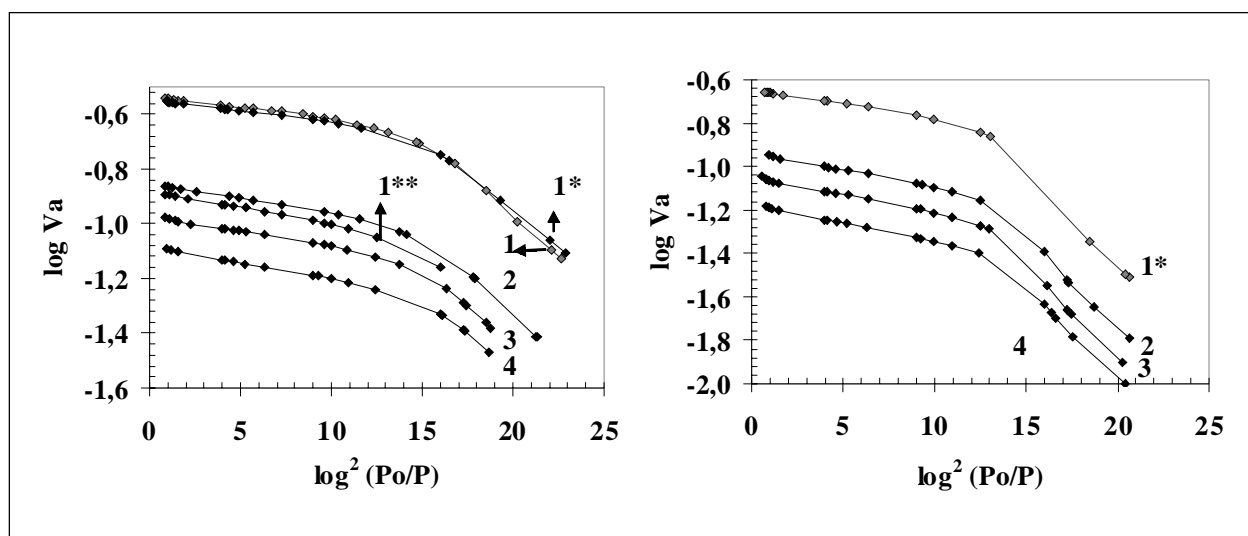


Figura 6. Curvas DR. a) Catalizadores frescos; b) Catalizadores tratados hidrotérmicamente; 1. ZY; 1*, ZY1; 1**, ZY2; 2. 45; 3. 35; 4. 25 % de zeolita.

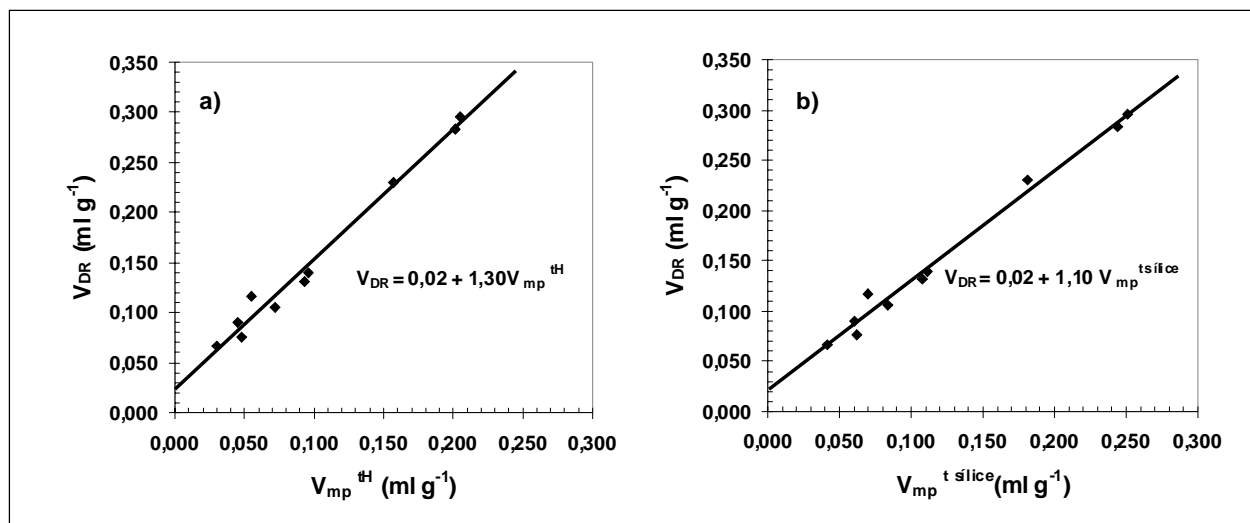


Figura 7. a) Correlación de V_{DR} versus V_{mp}^{tH} ; b) Correlación de V_{DR} versus $V_{mp}^{t sílice}$.

Donde V_{mp}^u es el volumen de ultramicroporos y V_{mp}^s es el volumen de supermicroporos de radio de poros entre 0,7 y 1,7 nm que no se han llenado a $P/P_0 = 7 \cdot 10^{-2}$.

Al examinar los resultados de las correlaciones planteadas en la figura 7 se deduce que el intercepto de las ecuaciones (4) y (5) corresponde al volumen V_{mp}^u y el volumen de supermicroporos está dado, en cada caso, por las expresiones:

$$V_{mp}^s = 1,30 * V_{mp}^{tH} \quad (7)$$

$$V_{mp}^s = 1,10 * V_{mp}^{t sílice} \quad (8)$$

Conclusiones

De los resultados obtenidos en este análisis textural se estableció que la selección de una referencia no porosa como la sílice hidroxilada para la aplicación del método de la curva - t es importante y conveniente porque permitió evaluar adecuadamente la microporosidad (ultra y supermicroporos) de las zeolitas comerciales y de los catalizadores frescos y tratados estudiadas en este trabajo; por lo que este procedimiento se constituye en materia de interés desde el punto de vista práctico para la caracterización de catalizadores frescos y usados en el proceso de craqueo catalítico.

Con este estudio se establecieron correlaciones cuantitativas de V_{DR} versus V_{mp}^{tH} y V_{DR} versus $V_{mp}^{t sílice}$ válidas para materiales frescos y tratados hidrotérmicamente; a partir de estos resultados se encontró que al combinar estos dos formulismos (curva - t / modelo DR) es posible

establecer cuantitativamente los dos términos que definen el volumen total de microporo calculado con el modelo de Dubinin - Radushkevich, con lo cual se obtiene el volumen de ultramicroporo cuya cuantificación no es accesible por los procedimientos basados en el espesor estadístico de la capa adsorbida.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Colombiano del Petróleo, al Instituto de Restauración del Ministerio de la Cultura y al Dr. Jaime Ortega, Gerente de Purificación y Análisis de Fluidos por el apoyo recibido.

Bibliografía

- Avidan A.A. 1993. Origin, development and scope of FCC catalysis. Fluid Catalytic Cracking, Studies in Surface Science and Catalysis. J.S. Maguee and M.M. Mitchell, Jr. Editors. Elsevier, Amsterdam **76**: 1-39.
- Brunauer S., L.S. Deming, W.E. Deming & E. Teller. 1940. On a theory of the van der Waals adsorption of gases. J. Amer. Chem. Soc. **62**: 1723-1732.
- Carruthers J.D., P.A. Cutting, R.E. Day, M.R. Harris, S.A. Mitchell & K.S.W. Sing. 1968. Standard data for the adsorption of nitrogen at -196°C on non-porous hydroxylated silica. Chemistry and Industry. 1772-1773.
- De Boer J.H., B.G. Linsen & Th.J. Osinga. 1965. Studies on pore systems in catalysts. VI. The universal t curve. Journal of Catalysis **4**: 643-648.
- Dubinin M.M. 1981. Inhomogeneous microporous structures of carbonaceous adsorbents. Carbon **19**: 321-324.

- Gregg S. J. & K. S. W. Sing.** 1991. Adsorption, Surface Area and Porosity, Second Edition, Academic Press, London. Capitulo 4: 195-247.
- Horniakova J., M. Králik, A. Kaszonyi & D.Mravec.** 2001. A practical approach to the treatment of adsorption-desorption isotherms, acidity and catalytic behaviour of zeolite catalysts. *Microporous and Mesoporous Materials* **46(2-3)**: 287-298.
- Humphries A., D.H. Harris & P. O'connor.** 1993. The nature of active sites in zeolites: Influence on catalyst performance. *Fluid Catalytic Cracking, Studies in Surface Science and Catalysis*. J.S. Maguee and M.M. Mitchell, Jr. Editors. Elsevier, Amsterdam **76**: 41-81.
- Leofanti G., M. Padovan, G. Tozzola & B. Venturelli.** 1998. Surface area and pore texture of catalysts. *Catalysis Today* **41**: 207-219.
- Lippens B.C. & J.H. De Boer.** 1965. Studies on pore systems in catalysts. V. The t-method. *Journal of Catalysis* **4**: 319-323.
- Navarro Uribe U.** 2002. Estudio del impacto de las condiciones de desactivación para simular a nivel de laboratorio, las propiedades de catalizadores de equilibrio de ruptura catalítica. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Raatz F. & H. Ajot.** 1988. Characterization of microporous catalysts by N₂ adsorption: Empirical correlations between parameters assessed by different methods. *Proceedings of the IUPAC-Symposium on the Characterization of Porous Solids (COPS)*, Bad Soden, FRG., K.K. Unger et al. Editors, Elsevier Amsterdam p.119-126.
- Scherzer J.** 1991. Designing FCC catalysts with high-silica Y zeolites. *Applied Catalysis* **75**: 1-32.
- Scherzer J.** 1993. Correlation between catalyst formulation and catalytic properties. *Fluid Catalytic Cracking, Studies in Surface Science and Catalysis*. J.S. Maguee and M.M. Mitchell, Jr. Editors. Elsevier, Amsterdam **76**: 145-182.
- Sing K.S.W.** 1967. Assessment of microporosity. *Chemistry and Industry*. 829-830.
- Sing K.S., D.H. Everett, R.A.W. Haul, L. Moscou, R.A. Pierotti, J. Rouquerol & T. Siemieniowska.** 1985. Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems. *Pure Appl. Chem.* **57**: 603-619.
- Storck S., H. Bretinger and W. F. Maier.** 1998. Characterization of micro- and mesoporous solids by physisorption methods and pore-size analysis. *Applied Catalysis A: General*, **174**: 137-146.
- Tonetto G., J. Atias & H. de Lasa.** 2004. FCC catalysts with different zeolite crystallite sizes: acidity, structural properties and reactivity. *Applied Catalysis A: General* **270(1-2)**: 9-253.

Recibido el 1° de febrero de 2006.

Aceptado para su publicación el 10 de abril de 2006.

DESCUBRIMIENTO DE UNA NUEVA ESPECIE DE *ATELOPUS* (BUFONIDAE) PARA COLOMBIA: ¿UNA LUZ DE ESPERANZA O EL OCASO DE LOS SAPOS ARLEQUINES?

por

Andrés R. Acosta-Galvis*, José Vicente Rueda-Almonacid**, Álvaro-A. Velásquez-Álvarez***, Santiago J. Sánchez-Pacheco*** & Johann A. Peña Prieto***

Resumen

Acosta-Galvis, A., J.V. Rueda, A.A. Velásquez, S.J. Sánchez & J.A. Peña. Descubrimiento de una nueva especie de *Atelopus* (Bufonidae) para Colombia: ¿Una luz de esperanza o el ocaso de los sapos arlequines? Rev. Acad Colomb. Cienc. **30** (115): 279-290, 2006. ISSN 0370-3908.

Se describe y nombra una nueva especie de anuro del género *Atelopus* de la Cordillera Oriental de Colombia. *Atelopus mittermeieri* sp. nov. difiere del resto de las especies del género en la Cordillera por su particular color ventral, rojo encendido. El hallazgo de una población densa y al parecer “saludable” resulta intrigante, ya que de las otras 3 especies registradas en la región no se han presentado observaciones recientes, lo cual hace temer un colapso en sus poblaciones. El reporte de esta nueva especie abre el camino para el estudio y conservación de los sapitos arlequines en Colombia.

Palabras clave: Anura, Bufonidae, *Atelopus*, *A. mittermeieri* sp. nov, Cordillera Oriental, Santuario Guanentá, Colombia.

Abstract

A new species of the genus *Atelopus* from the Cordillera Oriental region of Colombia is described and named. The pale red ventral colouration distinguishes *Atelopus mittermeieri* sp. nov. from other

* Profesor, Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ciencias. Unidad de Ecología y Sistemática (UNESIS). Maestría-Laboratorio de Anfibios Instituto de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D. C. Colombia. Correo electrónico: andres.acosta@javeriana.edu.co, aracostag@unal.edu.co

** Coordinador Programa Biodiversidad y Especies Amenazadas, Conservación Internacional-Colombia. Bogotá D.C. Colombia. Correo electrónico: jvrueda@yahoo.com

*** Laboratorio de Herpetología, Museo Javeriano de Historia Natural, Pontificia Universidad Javeriana. Correo electrónico: andresgoku@yahoo.com, sanchez-s@javeriana.edu.co, johanpena@yahoo.com

species of the genus in the region. The population appears to be large. This is especially intriguing as it is the only recent study of an anuran species in the region. There have been no long term studies of anuran populations in the Cordillera region, therefore population stability is impossible to predict; potentially a future collapse in a population may go undetected without further study. It is hoped that the finding of this new species might open the way for the study and conservation of harlequin toads in Colombia.

Key words: Anura, Bufonidae, *Atelopus*, *A. mittermeieri* sp. nov., Cordillera Oriental, Santuario Guanentá, Colombia.

Introducción

Recientes manuscritos sobre el estado de conservación de las ranas arlequines del género *Atelopus* señalan la existencia de al menos 81 especies y subespecies nominales y 32 taxones por describir (La Marca *et al.* 2005). Cerca de un 38,45% del total de especies conocidas y por describir sobre las que se tienen datos actualizados (45 taxones) han experimentado reducciones poblacionales significativas y solamente nueve mantienen poblaciones estables; sobre las demás especies se carece de información relativa a su estado de conservación por lo que han sido incluidas en la categoría de Datos Deficientes. Es muy probable que las 32 especies de *Atelopus*, cuyas poblaciones no han sido avistadas durante los últimos diez años, en el conjunto de localidades históricas, hayan desaparecido o estén a punto de extinguirse. Por otra parte, los resultados recientes del **Global Amphibian Assessment** (2004) revelaron que 61 especies de *Atelopus* se encuentran en la categoría de mayor riesgo: En Peligro Crítico y otras ocho en las categorías subsiguientes: En Peligro y Vulnerable; es decir que el 92% de los taxones conocidos de este género se hallan en inminente riesgo de extinción (Lötters *et al.* 2004; Stuart *et al.* 2004).

La actual crisis de extinción que enfrenta el grupo de los anfibios no tiene parangón en su historial evolutivo; de las 3.046 especies registradas en América, 1.187 (39%) se encuentran amenazadas de extinción, incluidas 337 especies catalogadas como En Peligro Crítico (Young *et al.* 2004) y más de un tercio de las especies de anfibios del mundo están amenazadas (www.globalamphibians.org). En algunas regiones del planeta, como en el sur de México, se han registrado desapariciones súbitas de hasta 31 poblaciones de anfibios pertenecientes a 24 especies diferentes (Lips *et al.* 2004). La posible causa de la declinación repentina de numerosas poblaciones de anfibios en el mundo se relaciona con la dispersión de un hongo patógeno (*Batrachochytrium dendrobatidis*) que causa quitridiomycosis y habita en el agua. Si bien se desconoce la manera como este patógeno y otras enfermedades pudieron incrementar su morbilidad y virulencia, se pre-

sume que se ha dado como resultado de cambios ambientales (el clima y la polución química) (Collins & Halliday 2005); a este hongo se le atribuye la mortalidad masiva de ranas en varias partes del mundo y las disminuciones de casi la mitad (47%) de todas las especies consideradas En Peligro Crítico (Young *et al.* 2004); igualmente se sabe además que este patógeno ha afectado nueve familias y más de 30 géneros de anfibios en Latinoamérica (Young *et al.* 2001).

Al parecer la rápida dispersión de este hongo fue propiciada por las actividades del hombre y en especial por la diseminación de la rana toro (*Rana catesbeiana*), la comercialización de enormes volúmenes de ranas como mascotas o alimento, el intercambio de ejemplares entre los zoológicos y la amplia utilización de ciertas especies de anfibios en ensayos biomédicos o para el control biológico, dado que muchas de estas especies son portadoras sanas del quitridio (Hanselmann *et al.* 2004); Weldon *et al.* (2004) sugieren al continente africano como el centro de origen del quitridio que afecta a los anfibios, el cual se diseminó a partir del comercio internacional de la rana de uñas *Xenopus laevis*, ocurrido en la primera mitad de 1930.

Si atendemos al hecho de que el colapso de las poblaciones ha sido documentado en al menos ocho familias y más de 30 géneros de anfibios neotropicales y que la presencia del quitridio en Colombia ya ha sido demostrada, las repercusiones de esta enfermedad para la salvaguarda del patrimonio natural del mundo pueden ser catastróficas, toda vez que nuestro país alberga una de las faunas más ricas y singulares del planeta. De hecho, como resultado de la iniciativa orientada a evaluar el estado de conservación de las ranas arlequines en Colombia (Rueda-Almonacid, *verbatim*), se constató el grave colapso poblacional de las 12 especies que fueron objeto de estudio y se presume que igual suerte corrieron las otras 26 especies reconocidas y la docena de especies que faltan por nominar. Por estas circunstancias, el reciente hallazgo de una especie indescrita, en los bosques de niebla del Santuario de Fauna y Flora de Guanentá-Alto Río

Fonce y cuyas poblaciones mantienen aún densidades altas, arrojan una luz de esperanza para la conservación de una de las últimas supervivientes de este rico linaje evolutivo.

Materiales y métodos

Los ejemplares adultos fueron preservados en una solución de etanol al 70% y las larvas en una solución de formaldehído al 10%; las dimensiones morfométricas se tomaron con un calibrador digital marca MITUTOYO de 0.1mm de precisión. La fotografía digital de las estructuras morfológicas se realizó mediante un estereoscopio digital marca MOTIC. La terminología utilizada para describir la textura de la piel acoge las definiciones dadas por **Lynch & Duellman** (1997), en tanto que las dimensiones lineales fueron tomadas acordes con las recomendaciones sugeridas por **Gray & Cannatella** (1985) y **Lötters** (1996). La descripción de los ejemplares adultos sigue las pautas adoptadas por **Rueda & Hoyos** (1991), **Vélez & Ruiz** (1997), y **Osorno et al.** (2001); mientras que la descripción de las larvas se realizó con base en las propuestas de **Altig & Mc Diarmid** (1999), **Mijares-Urrutia** (1998), **Grosjean** (2001) y **Boistel et al.** (2005). Se estudió un lote de renacuajos compuesto por 14 especímenes, en estadios de desarrollo 27 a 34 *sensu* **Gosner** (1960), obtenido en la localidad típica conjuntamente con el holótipo. Los siguientes acrónimos identifican a las colecciones de referencia, Colección Biológica de la Pontificia Universidad Javeriana, Museo Javeriano de Historia Natural (MUJ-MJHN) y Colección de Anfibios Universidad Nacional-Instituto de Ciencias Naturales (ICN-MHN).

Resultados

Atelopus mittermeieri sp. nov.

Holótipo. Una hembra adulta, obtenida por Andrés Acosta, Álvaro Velásquez & Santiago Sánchez, el 9 de julio de 2004 y depositada en la colección batracológica del Instituto de Ciencias Naturales, Museo de Historia Natural de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, bajo el número de ICN-MHN 52.993 (número de campo ARA 2411).

Alótipo. Un macho adulto, capturado en la misma localidad del holótipo, pero a una altitud más baja (2250 m.), por Álvaro-A. Velásquez & Santiago Sánchez, el 18 de julio del 2004, depositada en la colección de herpetología del Museo Javeriano de Historia Natural de la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá número de MUJ 3388 (número de campo AAV 114),

Paratopotipos. Dos machos adultos, números MUJ 3390-91, cuatro hembras adultas MUJ 3389, MUJ 3392-4 y un lote de renacuajos MUJ 3990 obtenidos en la misma localidad del holótipo por Andrés Acosta, Álvaro Velásquez & Santiago Sánchez, entre el 9-18 de julio, 2004, depositados en la colección de herpetología del Museo Javeriano de Historia Natural de la Pontificia Universidad Javeriana.

Paratipos. Individuos adultos depositados en la colección batracológica del Instituto de Ciencias Naturales-Museo de Historia Natural de la Universidad Nacional de Colombia y recolectados por Pedro M. Ruiz (q.e.p.d) y colaboradores en febrero de 1981 y mayo de 1983 en las siguientes localidades: Departamento de Santander, municipio de Charalá, Inspección de Policía Virolín, km 70 carretera Duitama a Charalá, Hacienda El Establo, ca. 2 km arriba de la desembocadura del Río Cañaverales, borde del Río Guillermo, ca. 2000 m de altitud, dos hembras bajo los números ICN7370, ICN7385, y 11 machos (ICN7371, ICN7374-75, ICN7376-77 (esqueletos coloreados), ICN7387-88, ICN7390, ICN7396, ICN7398, ICN7400-02. Departamento de Santander, municipio de Gambitá, Vereda Bogotacito, km 55-56, margen izquierda del Río Guillermo, 2400-2600 m de altitud, cinco hembras bajo los números ICN12747-51, y 16 machos ICN12752-62, ICN12765-69.

Localidad típica. Colombia, Departamento de Santander, vertiente occidental de la Cordillera Oriental, Municipio de El Encino, Santuario de Flora y Fauna Guanentá-Alto Río Fonce, vereda Río Negro, quebrada Aguas Claras, 6° 14' latitud N, 72° 56' longitud W, 2525 msnm.

Diagnosis. Un *Atelopus* referible al grupo *ignescens* (*sensu* **Lynch**, 1993), reconocible por la siguiente combinación de caracteres: 1) adultos de porte robusto y de tamaño mediano, longitud rostro-cloacal 32,99-33,36 mm (\bar{x} = 33,30, σ = 0,28, n = 3) en machos y 41,33-44,95 mm (\bar{x} = 43,67, σ = 1,74, n = 5) en hembras; 2) palmeadura manual vestigial, membrana pedial extensa (Figura 1); 3) miembros posteriores cortos, cuando la pata se adpresa al cuerpo el talón alcanza el margen anterior del ojo; longitud de la tibia menor al 37% de LRC; 4) primer dedo manual encorvado en los machos; 5) rostro acuminado en vista lateral y con el extremo de la maxila proyectado mucho más allá de la mandíbula; 6) piel del dorso y flancos, con verrugas grandes, raramente espiculadas, superficies ventrales lisas con gránulos difusos; región gular lisa; 7) tímpano y anillo timpánico ausentes, 8) columna vertebral sin exostosis de los procesos neurales, cresta supratimpánica poco desarrollada; 9) superficies del dorso café o negro con minúsculas manchas redondeadas de

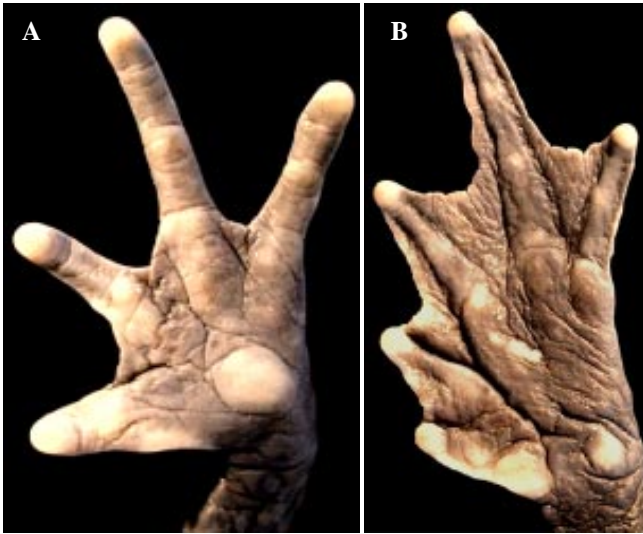


Figura 1. Vista ventral de la mano (a) y pie de *Atelopus mittermeieri* (b).

color blanco (especialmente concentradas a lo largo del margen del cuerpo y miembros así como los flancos y muslos) muy dispersas y en algunos casos ausentes; por lo regular región abdominal rojo encendido con una o dos manchas irregulares de color café o sepia dispuestas sobre el cuello, pecho y el bajo vientre; 10) renacuajos con las márgenes del disco oral transangulares y una hilera de papilas marginales, la fórmula dentaria es 2/3. Color general de las larvas negro con una mácula blanca sobre la base de la cola seguida por una mancha negra, y el último tercio traslúcido con algunos retículos.

Atelopus mittermeieri resulta inconfundible de todos sus congéneres de la Cordillera Oriental de Colombia por presentar un patrón en su coloración ventral, rojo encendido y la presencia de un collar sepia o café (Figura 2); los adultos de *Atelopus mittermeieri* poseen una marcada similitud con *A. ebeneoides marinkellei* en cuanto a las características cromáticas y morfológicas; sin embargo, existen diferencias notables en la menor longitud rostro-cloacal en machos, 44,5 mm en *A. ebeneoides marinkellei* y 32,99-33,36 mm en *A. mittermeieri*, y en la coloración roja del vientre con algunas manchas café en *A. mittermeieri* frente al negro uniforme con pequeñas manchas blancas de *A. ebeneoides marinkellei*.

Etimología: Nos es grato nominar esta especie en homenaje al Doctor Russell Alfred Mittermeier, herpetólogo y naturalista norteamericano, quién ha dedicado gran parte de su vida a fomentar el estudio de la fauna silvestre, la salvaguarda de los bosques tropicales y la conservación del patrimonio natural del mundo.



Figura 2. Diseño de color ventral en *Atelopus mittermeieri*.

Descripción de la serie típica

Porte algo robusto; el rostro en vista lateral es acuminado y el extremo de la maxila se proyecta un poco más allá de la mandíbula; narinas externas con aberturas subovoides, amplias, algo protuberantes, dispuestas oblicuamente en sentido anteroventral y más alejadas al ángulo anterior de la orbita que del extremo rostral, se ubican dorso-lateralmente casi a la misma altura de la sínfisis mandibular. La región loreal es cóncava, poco amplia y angulada interiormente; la región supralabial es prominente en algunos ejemplares, en otros apenas conspicua; el *canthus rostralis* es grueso y redondeado. El diámetro transversal del ojo excede ligeramente la longitud narina-ojo; el párpado superior es grueso y carnoso. El rostro en vista dorsal es de forma triangular, su extremo es redondeado y muy abultado hacia los bordes externos, la superficie dorsal de la región cefálica es plana. Glándulas parotoideas conspicuas y elongadas, casi dos veces más largas que anchas, dispuestas dorsolateralmente y se extienden justo desde el margen posterior del párpado

hasta un punto situado a nivel dorsal a la inserción del brazo. Coanas pequeñas y redondeadas, ampliamente separadas entre sí y parcialmente ocultas por el escudo palatal del arco maxilar; dientes vomerinos, palatinos y maxilares ausentes; lengua espatulada libre en sus 2/3 posteriores; machos sin sacos vocales prominentes, hendiduras vocales, laterales a la lengua, dirigidas hacia la articulación mandibular. Tímpano, membrana timpánica y anillo timpánico, ausentes.

El antebrazo es muy robusto en los machos y delicado y poco engrosado en las hembras; membrana interdigital manual vestigial, dedos largos, sin rebordes dérmicos y redondeados en su extremo distal; la longitud relativa de los dígitos manuales en orden ascendente de tamaño es $I < II < III < IV$, el extremo distal del dedo II se extiende hasta la base del tubérculo subarticular de la segunda falange del dedo III. Tubérculos subarticulares poco definidos, los basales subovoides, tubérculos supernumerarios grandes, aplanados y redondeados; el tenar poco definido, ovalado apenas conspicuo. Primer dedo manual de los machos corto, grueso y encorvado. Machos con excrescencias nupciales blanquecinas o negruzcas constituidas por finas espínulas que cubren el dorso del *pollex* y la base del segundo dedo. Miembros posteriores delgados. Cuando las piernas se extienden hacia adelante, paralelas a los flancos, el tubérculo metatarsal externo alcanza el nivel medio o sobrepasa la orbita; cuando los miembros, de un mismo lado del tronco, se colocan flexionados y paralelos al plano sagital del cuerpo, los codos y rodillas distan de superponerse entre sí, en las hembras, en tanto que en los machos se solapan ligeramente. Cuando las piernas se flejan y los muslos se disponen perpendiculares al plano sagital del cuerpo, los talones entran en contacto tanto en hembras como en machos.

Tubérculo metatarsal externo pequeño, redondeado y elevado, casi tres veces más pequeño que el tubérculo metatarsal interno, que es plano y ovoide. Tubérculos supernumerarios escasos, poco evidenciables, los subarticulares discretos, algo elevados, Dedos del pie aguzados, ligeramente dilatados; dispuestos en orden creciente de tamaño $I < II < IV < V < III$, el tercer dedo solo ligeramente más largo que el quinto; patas bien palmeadas, membrana interdigital pedial gruesa, bastante escotada y extendida de la siguiente manera (*sensu* Myers & Duellman, 1982): $I0-0II0-2^{1/3}III^{1/2}-2^{1/3}IV2^{1/2}-0V$.

Piel del dorso de la cabeza lisa, la de la región corporal, con tubérculos aplanados y espículas de color blanco muy difusas, apenas notables y de distribución uniforme, en las hembras adultas, mientras que en los machos los tubérculos son más elevados; las superficies expuestas de

los miembros anteriores con abundantes tubérculos grandes, elevados, al igual que sobre las superficies expuestas de la pierna y pie. En vista lateral, las superficies de los flancos cefálicos son lisas en la región loreal, supraorbital y supralabial, mientras que la región postorbital presenta tubérculos agrandados y en algunos ejemplares tiene pústulas grandes, muy densas y prominentes; flancos troncates con tubérculos aplanados grandes y algunas pústulas muy dispersas siendo variable en la serie típica observada, donde algunos ejemplares presentan mayor concentración de tubérculos elevados y en una hembra adulta la superficie es lisa con espículas dispersas. Superficies ocultas, muslos anterior y posterior lisas y finamente granular con tubérculos apenas visibles hacia la rodilla. Superficies ventrales, zona anterior de la gula, pecho y vientre, lisos con algunos gránulos y tubérculos dispersos; superficies ventrales de los miembros finamente granulares. Abertura cloacal situada a nivel medio de los muslos, dirigida posteriormente, muy evidente, tuberculada y con repliegues dérmicos circundantes.

Coloración *in vivo*. Superficie dorsal de la cabeza, la región corporal y las superficies expuestas de los miembros anteriores, muslo pierna y pie de color café oscuro a negro con algunas pecas o manchas irregulares, dispersas, blancas de tamaño pequeño que no sobrepasan el diámetro del ojo; en vista lateral la superficie de los flancos cefálicos son del mismo color del dorso, generalmente con una mancha irregular de color blanca en la región infraorbital; el flanco troncal es café rojizo; las superficies ocultas, ingle, muslos anterior y posterior son de color café; superficies ventrales, el color de la zona anterior de la gula y pecho fluctúa de café a negro, vientre y muslos rojos, generalmente estas regiones presentan manchas y pecas irregulares café; región palmar y plantar de color café con tubérculos de color salmón; iris negro (Figura 3).



Figura 3. Vista lateral del holotipo de *Atelopus mittermeieri*.

Color en etanol al 70%. Las superficies dorsales y laterales de la región corporal y las superficies expuestas de los miembros anteriores, muslo pierna y pie de color café; las manchas blanquecinas se tornan crema; flanco troncal café claro; superficies ocultas, ingle muslos anterior y posterior café; superficies ventrales, gula y pecho que varían de café a negro en vivo, se tornan de color naranja; aunque en algunos de los machos de la serie típica se transforma en crema; vientre y muslos naranja, las manchas irregulares en preservación se tornan café; región palmar y plantar de color café con tubérculos de color crema.

Dimensiones del holótipo (en mm). Longitud rostro-urostilar = 42,12; longitud rostro-cloacal = 44, 95; anchura cefálica = 11,82; longitud cefálica = 12,73; longitud

femoral = 15,54; longitud tibial = 15,44; longitud pedial = 18,23; diámetro anteroposterior del ojo = 3,64; longitud cefálica = 5,94; distancia interorbital = 4,71; distancia ojo-narina = 3,45; anchura del párpado superior = 3,18. Las dimensiones corporales y las relaciones porcentuales de la serie típica se presentan en la Tabla 1.

Peso de dos hembras adultas y grávidas: 6.1 y 6.8 gramos.

Descripción de las larvas (estadios 27-34 de Gosner)

En vista dorsal el cuerpo es corto y de forma ovoide, el rostro es semicircular; los ojos muy pequeños y con las pupilas visibles, se encuentran dispuestos dorsalmente. La línea orbitonasal no es evidente. Los orificios nasales son ovoides y presentan un reborde bajo en su región

Tabla 1. Dimensiones y variabilidad de la serie típica de *Atelopus mittermeieri*

| Características | | Variabilidad | Media/DES | n |
|-------------------------------|---|--------------|----------------|---|
| Longitud rostro cloaca (LRC) | ♂ | 32,99-33,36 | 33,30+/- 0,28 | 3 |
| | ♀ | 41,33-44,95 | 43,67+/- 1,74 | 5 |
| Longitud cefálica (Lc) | ♂ | 10,69-10,77 | 10,73 +/- 0,04 | 3 |
| | ♀ | 11,19-13 | 12,19+/- 0,71 | 5 |
| Anchura cefálica (Ac) | ♂ | 9,57-10,94 | 10,14 +/- 0,71 | 3 |
| | ♀ | 10,7-12,42 | 11,62+/- 0,63 | 5 |
| Longitud femoral (Lf) | ♂ | 11,93-12,98 | 12,44+/- 0,52 | 3 |
| | ♀ | 14,53-17,3 | 15,73+/- 1,02 | 5 |
| Longitud tibio-fibula (Ltf) | ♂ | 11,59-12,69 | 11,97 +/- 0,62 | 3 |
| | ♀ | 14,39-15,55 | 15,2 +/- 0,46 | 5 |
| Longitud rostral (Lr) | ♂ | 4,55-4,95 | 4,7 +/- 0,22 | 3 |
| | ♀ | 5,66-6,38 | 6,08+/- 0,27 | 5 |
| Distancia interorbital (Di) | ♂ | 2,84-3,44 | 3,07+/- 0,32 | 3 |
| | ♀ | 3,89-4,63 | 4,03+/- 0,33 | 5 |
| Diámetro del ojo (Do) | ♂ | 3,19-3,39 | 3,30+/- 0,10 | 3 |
| | ♀ | 3,1-3,69 | 3,49+/- 0,23 | 5 |
| Distancia ojo-narina (Don) | ♂ | 2,75-2,95 | 2,82 +/- 0,10 | 3 |
| | ♀ | 3,09-3,45 | 3,28+/- 0, 16 | 5 |
| Distancia internarinas (DI) | ♂ | 2,73-3,15 | 2,90 +/- 0,21 | 3 |
| | ♀ | 3,24-3,99 | 3,798+/- 0,37 | 5 |
| Anchura del párpado (Ap) | ♂ | 2,33-2,73 | 2,58 +/- 0,22 | 3 |
| | ♀ | 2,78-2,92 | 2,82 +/- 0,05 | 5 |
| Distancia narina-rostro (Dnr) | ♂ | 1,39-1,99 | 1,75 +/- 0,31 | 3 |
| | ♀ | 1,84-2,22 | 1,99 +/- 0,14 | 5 |
| Ltf x 100/LRC | ♂ | 34,89-37,81 | 35,94+/- 1,62 | 3 |
| | ♀ | 33,87-36,55 | 34,82+/- 1,03 | 5 |
| Lf x 100/LRC | ♂ | 35,77-38,69 | 37,37+/- 1,47 | 3 |
| | ♀ | 34,57-38,67 | 36,03+/- 1,65 | 5 |

dorsal, no están protuidos y se abren al nivel de la superficie del cuerpo; están situados más cerca del ojo que del extremo del rostro, siendo visibles dorsal, frontal y lateralmente. El espiráculo es único, siniestro y evidente en vista dorsal, se origina justo a nivel medio del cuerpo; presenta un corto tubo espiracular, el cual se proyecta sobre el lado del cuerpo en sentido posterolateral.

El cuerpo es más ancho que alto, el rostro es redondeado (truncado), la región gular es convexa, la branquial es plano-cóncava y la abdominal es plano-convexa; la parte lateral de las papilas marginales del disco oral son visibles. Ventralmente el disco oral es agrandado, emarginado, siendo de posición subterminal ventral; la ventosa abdominal es en forma de U, abierta hacia el disco oral, se

encuentra visiblemente separada del tubo proctodeal; la ventosa abdominal nunca sobrepasa la anchura corporal, con respecto a la longitud corporal ocupa la mitad o un poco más de esta. El tubo proctodeal (cloacal) es de aspecto cónico, más ancho en el extremo libre y se abre al centro de la aleta ventral.

La longitud caudal excede a la del cuerpo (Tabla 2) y la cola tiene forma redondeada en su extremo posterior (Mijares-Urrutia 1998). El origen de la aleta dorsal no se desplaza sobre el cuerpo y en el margen anterior es ligeramente cóncava, alcanza su mayor altura un poco después del nivel medio de la cola. El origen de la aleta ventral está asociado al tubo proctodeal y su margen es recto. La musculatura caudal tiene un mayor tamaño (altura) hacia

Tabla 2. Dimensiones de los renacuajos de *Atelopus mittermeieri*. Abreviaturas según Boistel *et al.* (2005): ss, distancia del extremo del rostro a la abertura del espiráculo; su, distancia del extremo del rostro a la inserción de la aleta dorsal; sv, distancia del extremo del rostro a la abertura del tubo proctodeal; vt, distancia de la abertura del tubo proctodeal al ápice de la cola; tl, longitud total; uf, altura máxima de la aleta dorsal; lf, altura máxima de la aleta ventral; ht, altura máxima de la cola; bh, altura máxima del cuerpo (sin tener en cuenta el disco suctorial o abdominal); bw, anchura máxima del cuerpo; pp, distancia entre las pupilas; nn, distancia entre las narinas; ed, diámetro máximo del ojo; sw, anchura máxima del disco suctorial o abdominal; odw, anchura del disco oral.

| Estadio | ss | su | sv | vt | tl | uf | lf | ht | bh | bw | pp | nn | ed | sw | odw |
|-----------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 34 (n: 1) | 4.15 | 6.32 | 6.66 | 8.31 | 14.77 | 0.57 | 0.47 | 1.77 | 2.60 | 3.92 | 2.13 | 1.19 | 0.86 | 3.69 | 3.37 |
| 33 (n: 2) | 4.01 | 6.04 | 6.10 | 7.94 | 13.89 | 0.54 | 0.43 | 1.66 | 2.34 | 3.42 | 1.94 | 1.13 | 0.71 | 3.29 | 3.16 |
| | 3.88 | 5.50 | 5.55 | 7.21 | 12.93 | 0.53 | 0.44 | 1.56 | 2.28 | 3.38 | 1.89 | 1.08 | 0.66 | 3.22 | 3.11 |
| 32 (n: 3) | 3.92 | 5.63 | 6.09 | 7.59 | 13.24 | 0.54 | 0.49 | 1.60 | 2.39 | 3.45 | 2.01 | 1.16 | 0.69 | 3.33 | 3.18 |
| | 3.45 | 5.26 | 5.32 | 6.38 | 12.16 | 0.42 | 0.35 | 1.49 | 2.16 | 3.24 | 1.76 | 1.03 | 0.61 | 3.13 | 2.99 |
| | 3.98 | 5.83 | 6.12 | 7.66 | 13.74 | 0.55 | 0.45 | 1.63 | 2.44 | 3.48 | 1.92 | 1.15 | 0.72 | 3.35 | 3.16 |
| 31 (n: 1) | 4.05 | 6.09 | 6.36 | 7.97 | 13.93 | 0.55 | 0.46 | 1.73 | 2.42 | 3.52 | 1.99 | 1.16 | 0.75 | 3.33 | 3.20 |
| 30 (n: 2) | 3.85 | 5.44 | 5.46 | 7.18 | 12.97 | 0.53 | 0.47 | 1.54 | 2.24 | 3.35 | 1.87 | 1.06 | 0.68 | 3.20 | 3.09 |
| | 3.93 | 5.57 | 6.08 | 7.64 | 13.03 | 0.58 | 0.45 | 1.53 | 2.46 | 3.43 | 1.93 | 1.17 | 0.69 | 3.34 | 3.19 |
| 29 (n: 2) | 3.69 | 5.32 | 5.43 | 7.21 | 12.34 | 0.49 | 0.44 | 1.50 | 2.18 | 3.30 | 1.80 | 1.06 | 0.63 | 3.17 | 3.03 |
| | 3.74 | 5.39 | 5.45 | 7.29 | 12.53 | 0.56 | 0.47 | 1.52 | 2.22 | 3.32 | 1.84 | 1.09 | 0.62 | 3.18 | 3.06 |
| 28 (n: 1) | 3.41 | 5.18 | 5.27 | 6.35 | 11.98 | 0.39 | 0.31 | 1.44 | 2.11 | 3.21 | 1.72 | 1.01 | 0.60 | 3.10 | 2.98 |
| 27 (n: 3) | 3.65 | 5.26 | 5.39 | 6.84 | 12.06 | 0.43 | 0.34 | 1.48 | 2.15 | 3.28 | 1.79 | 1.04 | 0.58 | 3.15 | 3.01 |
| | 3.38 | 5.13 | 5.23 | 6.31 | 11.92 | 0.35 | 0.26 | 1.39 | 2.07 | 3.19 | 1.67 | 1.00 | 0.56 | 3.09 | 2.97 |
| | 3.43 | 5.20 | 5.33 | 6.42 | 12.01 | 0.40 | 0.31 | 1.46 | 2.13 | 3.24 | 1.72 | 1.02 | 0.58 | 3.12 | 2.98 |
| 26 (n: 1) | 3.28 | 5.02 | 5.24 | 6.35 | 11.56 | 0.37 | 0.27 | 1.36 | 2.02 | 3.11 | 1.61 | 0.96 | 0.51 | 3.05 | 2.95 |
| 25 (n: 1) | 3.16 | 4.97 | 5.19 | 6.27 | 11.32 | 0.32 | 0.24 | 1.29 | 1.96 | 3.03 | 1.56 | 0.91 | 0.47 | 2.99 | 2.88 |

la mitad proximal y se va atenuando gradualmente hacia atrás, sin alcanzar el extremo de la aleta.

Los márgenes anterior y posterior del disco oral son lisos, transangulares (no están divididos por una hendidura angular a cada lado *sensu* Mijares-Urrutia, 1998). Las papilas marginales están dispuestas en una o dos hileras, llegando hasta el borde interno de la ventosa, sin llegar a tocarla. La fórmula dentaria es 2/3, los queratodontes A1 y A2 (hileras de dientes anteriores) son similares en longitud, al igual que entre P1, P2 y P3 (hileras de dientes posteriores). Los queratostomas se encuentran parcialmente queratinizados; el supraqueratostoma es levemente cóncavo; el infraqueratostoma es recto, apenas visible (a veces cubierto por la fila de queratodontes) y presenta aserraduras subtriangulares poco visibles.

Curiosamente un examen de las estructuras queratinizadas del disco oral evidenció la pérdida o destrucción parcial de las hileras de dentículos en la mayor parte de los renacuajos recolectados, estas estructuras se observaron intactas únicamente en 4 especímenes, hecho que podría indicar contaminación con el hongo quitridio.

Coloración *in vivo*. Si bien el patrón de color de las larvas de *Atelopus mittermeieri* sigue el esquema general característico de las especies altimontanas del género, con el cuerpo negro y una banda blanca en la base de la cola; el colorido en detalle de los renacuajos es el siguiente: el dorso del cuerpo es de color negro a café oscuro, algunos con diminutas punteaduras blancas muy dispersas y una pequeña zona despigmentada entre el espiráculo y el ojo, con algunas punteaduras negras. En vista lateral, toda la musculatura caudal es de color blanca, la piel que cubre el primer tercio es translúcida con algunos puntos negros dispersos, el segundo tercio es una banda negra (un poco más angosta que la primera) y el último tercio es translúcido con un retículo y puntitos negros muy dispersos; las aletas dorsal y ventral son translúcidas con punteaduras negras. En vista ventral, la superficie del disco oral, la región gular, el pecho, la ventosa abdominal y el peritoneo son translúcidos, la ventosa abdominal presenta una concentración de punteaduras de color negro hacia el área central y algunas veces en el borde; el intestino es visible y de color blanco con algunos retículos negros muy agrupados; el espiráculo es translúcido con un retículo negro, en tanto el tubo proctodeal (=cloacal) es incoloro con punteaduras negras (Figuras 4 y 5).

Color en formalina al 10%. No varía con respecto a la descripción *in vivo*.

Distribución. *Atelopus mittermeieri* es conocido de tres localidades aledañas, situadas dentro o en la periferia



Figura 4. Aspecto lateral de un renacuajo de *Atelopus mittermeieri*.

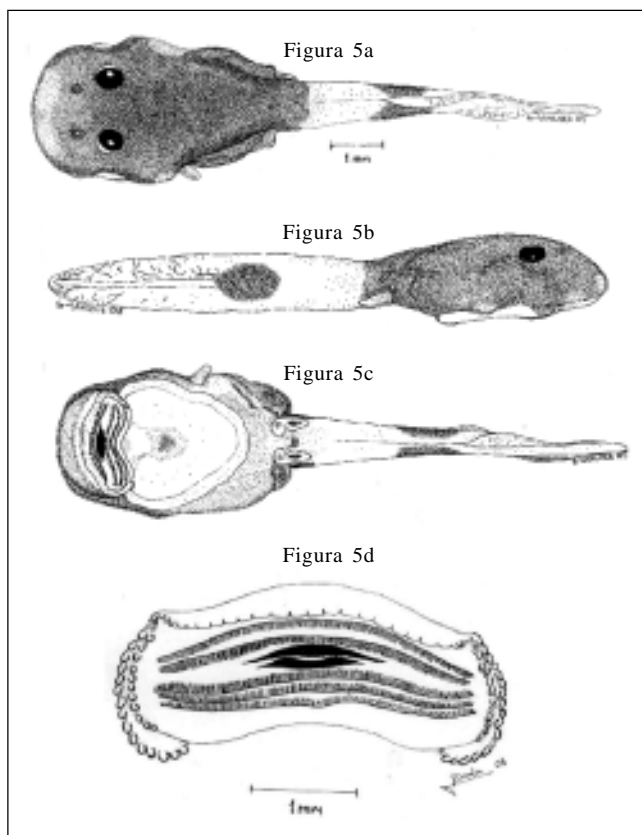


Figura 5. Vista dorsal (a), lateral (b), ventral (c) y detalle del aparato bucal de un renacuajo de *Atelopus mittermeieri* (d).

del Santuario de Flora y Fauna Guanentá Alto-Río Fonce; una de ellas se ubica en la Hacienda El Establo, ca 2km arriba de la desembocadura río Cañaverales, Km. 70 carretera Duitama a Charalá, Inspección Policía Virolín, municipio Charalá; otra en el municipio de Gámbita, vereda

Bogotacito, Km 55-56 carretera Duitama a Charalá, margen izquierda del río Guillermo, 6°00'07'' latitud N, 73°47'05'' longitud W de Greenwich, 2400 msnm, y la última en la localidad típica en la quebrada Aguas Claras, vertiente Occidental de la Cordillera Oriental, departamento de Santander, Colombia. Entre 2250-2750 msnm.

Dimorfismo sexual. Al igual que en la mayor parte de las especies del género, las hembras exceden significativamente el tamaño de los machos, poseen la piel mucho más lisa y son de textura más esbelta. Por su parte, los machos tienen los miembros más cortos y robustos, los antebrazos más engrosados y exhiben la piel más verrugosa y tuberculada. No se notaron diferencias en las coloraciones del dorso y vientre entre los dos sexos.

Variabilidad de la serie típica. Una hembra adulta MUJ 3394 presenta en las superficies dorsales del tronco y muslo espículas de color crema; en algunos ejemplares la región postorbital presenta tubérculos con pústulas de color crema, flancos troncales con tubérculos aplanados grandes o de textura lisa con espículas dispersas; una de las hembras de la serie típica posee espículas distribuidas uniformemente en las superficies dorsales.

Aspectos ecológicos y reproductivos. *Atelopus mittermeieri* ha sido recolectado activo durante el día, entre las 7:00-17:45 horas, moviéndose entre las rocas, o nadando en los cursos de agua, sobre el cauce de quebradas con caudal permanente, y en sectores moderadamente inclinados cubiertos de selva andina. Dos hembras adultas fueron atrapadas, la primera sobre una roca a las 12:00 horas y la otra a las 7:00 horas en las oquedades de las rocas. Un macho adulto fue hallado en una piedra en el borde de la quebrada (13:30 horas). Así mismo, dos parejas amplexantes fueron registradas (12:30 horas) nadando en contra de la corriente de la quebrada Aguas Claras. Las larvas han sido halladas en remansos de las quebradas, generalmente adheridas en cualquier parte de la superficie de las rocas, y entre 10 y 50 cm de profundidad. Una hembra adulta disectada contenía 393 huevos de color crema, entre 1,46-2,01 mm de diámetro (media=1,79 σ =0.1 n=50), aparentemente la especie se reproduce después de las estaciones lluviosas durante el veranillo, época en la cual se han encontrado una gran cantidad de larvas.

La mayor parte de los individuos de la serie típica (ocho de un total de 10 adultos) fueron recolectados en la orilla de la quebrada Aguas Claras durante el mes de julio, incluidas dos parejas amplexantes; esfuerzos de muestreo con una intensidad similar y efectuados en el mes de marzo solo condujeron al hallazgo de 2 hembras adultas con numerosos huevos intra-abdominales; sin

embargo, abundantes renacuajos fueron observados en ambas épocas. Hasta el momento se han escuchado y observado vocalizaciones atribuibles a esta especie durante los meses de mayo y agosto. Estimaciones de las densidades de renacuajos realizadas mediante un muestreo aleatorio simple, a lo largo de un trayecto de 1 km de longitud en la quebrada Aguas Claras, durante la primera semana del mes de abril del 2005, arrojaron un promedio de 6.4 larvas por m², con una variabilidad de 0-43 individuos m² y estas densidades se observaron casi de manera ininterrumpida en un tramo del río de 3 km de longitud comprendido entre los 2250 msnm y los 2750 m de altitud. Las larvas en casi todos los estadios de desarrollo rehuyeron las corrientes muy fuertes y saltos de agua, así como también las pocetas de aguas estancadas en las orillas de las quebradas, casi siempre se observaron en los remansos. Todos los renacuajos fueron observados durante el día, a simple vista o levantando las rocas, adheridos a ellas. La temperatura del agua fluctuó entre 9-14°C durante el período de estudio y es bastante rica en oxígeno y con un pH de 6 registrado entre los meses de abril y agosto del año 2005.

Atelopus mittermeieri habita los bosques altoandinos que colindan hasta el Páramo de la Rusia, el dosel del arbolado no sobrepasa los 10 m de altura y los fustes de los mismos poseen abundantes musgos y epifitas. La vegetación dominante consiste en robledales casi puros de *Quercus humboldtii*, el cual es reemplazado en las cimas de las laderas por *Quercus colombiana* y palmas zanconas *Catoblastos andinus*, la temperatura en la zona varía entre los 11°C y los 25°C y las precipitaciones no sobrepasan los 2000 mm. La distribución de la precipitación se ajusta a un régimen bimodal, con dos épocas lluviosas que abarcan los meses de abril-junio y septiembre-noviembre, siendo esta última la de mayor pluviosidad.

Comentarios

Lynch (1986) en sus notas sobre la biología reproductiva de *Atelopus subornatus* registra para los renacuajos de este género la similitud en coloración de las bandas caudales crema y negro, las cuales pueden aparecer en varias especies altimontanas, como en el caso de *Atelopus mittermeieri*; **Vélez & Ruiz** (1997) señalan que la distribución de estos patrones cromáticos larvales (crema y negro o viceversa) pueden ser clasificados en dos grupos diferenciales donde las larvas de *Atelopus mittermeieri* presentan coloración negra o café uniforme en todo el cuerpo, siendo agrupada con *A. ebenoides marinkellei*, *A. muisca*, *A. nahumae*, *A. quimbaya*, *A. sernai*, *A. minutulus* y *A. nicefori*.

Con la descripción de *Atelopus mittermeieri* se reconocen cuatro especies de sapitos arlequines para el departamento de Santander en Colombia, dos de las cuales se localizan dentro del límite del Santuario de Guanentá-Alto río Fonce: *Atelopus mono-hernandezii* de la cuenca alta del río Cañaverales a 2200 m de altitud y *A. mittermeieri* en la cuenca alta del río Negro y en la hoya del río La Rusia; todos estos son afluentes del río Fonce que drena hacia el valle del río Magdalena a través del río Suárez, y la distancia en línea recta entre cada una de las poblaciones de estas especies no supera los 15 km. Prospecciones preliminares, aunque no exhaustivas, realizadas en la localidad típica de *A. mono-hernandezii* durante el 2004, revelaron la desaparición de esta especie, posiblemente como resultado del fenómeno de declinación.

¿Curiosamente el reciente hallazgo de una población densa y al parecer “saludable” de *A. mittermeieri*, resulta intrigante toda vez que este hecho se podría atribuir a la ausencia de contaminación con el quitridio en la quebrada Aguas Claras?, ¿una mayor resistencia a la enfermedad?, ¿o un mejor estado de conservación de la microcuenca de la quebrada Aguas Claras? ¿o a la dinámica poblacional característica de esta especie? Las dos primeras hipótesis parecen ser las menos plausibles puesto que algunos individuos mantenidos en cautiverio murieron a los pocos días y exhibieron poco antes del deceso un comportamiento errático y agonístico propio de los individuos contaminados con el quitridio y el cual consistió en restregarse el cuerpo con los miembros y revolcarse sobre si mismos. Así mismo, durante el desarrollo de la evaluación poblacional *in situ*, se encontró un individuo agónico y otro en descomposición cubierto por hongos. De hecho la pérdida de los dentículos y la destrucción de las estructuras córneas del aparato bucal de los renacuajos de *A. mittermeieri* puede ser el primer síntoma de esta enfermedad la cual resulta inocua para los mismos pero es letal para los estadios postmetamórficos (Rachowicz, 2002).

Otro factor de riesgo para la conservación de este sapito arlequín en la cuenca alta de la quebrada Aguas Claras es la presencia de trucha arco iris, la cual suele ser asociada con la declinación de los anfibios; así mismo se observó un porcentaje bastante significativo de ranas con deformaciones en los miembros (mutilaciones y malformaciones) los cuales presagian elevados niveles de contaminación. Una amenaza que requiere ser evaluada en detalle consiste en las crecientes repentinas de los niveles del río, durante la temporada invernal, que eventualmente podría arrasar con todos los individuos que se encuentren en las orillas y en especial de los machos que residen permanentemente en cercanías de las quebradas o ríos; quizás este hecho tam-

bién podría explicar el desbalance sexual a favor de las hembras anunciado por **Rainer Schulte** (*verbatim*) para una población de *Atelopus* del Perú y que este investigador atribuye al contagio con el hongo quitridio.

Cualquiera que sea la causa del fenómeno de la declinación que está afectando a esta rana de montaña reafirma nuestra convicción de intentar salvaguardarla a través de su crianza en confinamiento, para lo cual se ha creado el Laboratorio de Conservación de Anfibios Neotropicales con sede en la Pontificia Universidad Javeriana en Bogotá y el cual cuenta con el apoyo de Conservation International y la Iniciativa Darwin.

Agradecimientos

El desarrollo de este trabajo fue posible gracias al apoyo recibido del proyecto de investigación No.1580 “Variación de la comunidad de heterópteros, anuros y vegetación a lo largo de un gradiente altitudinal en un bosque Andino”, dirigido por los profesores Andrés Acosta, Giovanni Fagua y Mauricio Díaz Granados y financiado por la Vicerrectoría Académica de la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá; igualmente deseamos resaltar el soporte recibido de la Iniciativa *Atelopus* patrocinada por la Iniciativa Darwin. Hacemos extensivo este reconocimiento a Carolina Roa de la Fundación Natura por el apoyo logístico brindado en la Estación Biológica Cachalú, igualmente al Coordinador de Investigaciones de la Unidad de Parques del Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, José Sinisterra y al Director del Santuario de Flora y Fauna Guanentá, Alto Río Fonce, Jorge Díaz. Marco A. Rada aportó la ilustración del disco oral del renacuajo. Por último gracias a Stephanie O’Connor estudiante de Wildlife Biology Bsc en University of Newcastle Upon Tyne, por su colaboración en la elaboración del Abstract.

Poco tiempo después de haber remitido el manuscrito a la Academia de Ciencias comprobamos que *Atelopus mittermeieri*, era la misma especie que las colegas María Cristina Ardila y Mariela Osorno pensaban describir como *Atelopus “romeroi”*, en homenaje póstumo al colega y amigo Hernando Romero Zambrano (q.e.p.d.), quién encontró los primeros individuos en 1981; deseamos resaltar la delicadeza de las colegas al ceder sus derechos y permitirnos utilizar sus datos en la presente publicación.

Bibliografía

- Acosta, A. R. & J. V. Rueda. 2004. Sapito arlequín esmeralda. *Atelopus muisca*. Pp. 128-131. In: Rueda J. V., J. D. Lynch & A. Amézquita (eds). 2004. Libro Rojo de los Anfibios de Co-

- lombia. Serie de Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Conservation International. Instituto de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Colombia, Ministerio del Medio Ambiente. Bogotá, Colombia, 384 pp.
- Altig, R. & R.W. Mc Diarmid.** 1999. Body plan development and morphology. Pp. 24-51. *In:* Mc Diarmid R.W. & R. Altig (eds.). 1999. Tadpoles: The biology of anuran larvae. The University of Chicago Press. 444 pp.
- Amézquita, A. & M. Osorno.** 2004. Sapito arlequín de La Calera. *Atelopus lozanoi*. Pp. 122-127. *In:* Rueda J. V, J. D. Lynch & A. Amézquita (eds). 2004. Libro Rojo de los Anfibios de Colombia. Serie de Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Conservation International. Instituto de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Colombia, Ministerio del Medio Ambiente. Bogotá, Colombia, 384 pp.
- Ardila, M. C.** 1999. Una nueva especie de *Atelopus* A.M.C. Dumeril-Bibron 1841 (Amphibia: Anura: Bufonidae) de la cordillera Oriental de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 23 (86):139-142.
- Ardila, M. C. & R. A. Maldonado.** 2004 a. Sapito arlequín de Nariño. *Atelopus ignescens*. Pp. 132-136. *In:* Rueda J. V, J. D. Lynch & A. Amézquita (eds). 2004. Libro Rojo de los Anfibios de Colombia. Serie de Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Conservation International. Instituto de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Colombia, Ministerio del Medio Ambiente. Bogotá, Colombia, 384 pp.
- Ardila, M. C. & R. A. Maldonado.** 2004 b. Sapito arlequín camuflado. *Atelopus minutulus*. Pp. 189-192. *In:* Rueda J.V, J.D. Lynch & A. Amézquita (eds). 2004. Libro Rojo de los Anfibios de Colombia. Serie de Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Conservation International. Instituto de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Colombia, Ministerio del Medio Ambiente. Bogotá, Colombia, 384 pp.
- Ardila, M. C., M. Osorno & R. A. Maldonado.** 2004. Sapito arlequín negro. *Atelopus ebenoides marinkellei*. Pp. 112-115. *In:* Rueda J. V, J. D. Lynch & A. Amézquita (eds). 2004. Libro Rojo de los Anfibios de Colombia. Serie de Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Conservation International. Instituto de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Colombia, Ministerio del Medio Ambiente. Bogotá, Colombia, 384 pp.
- Berger, L., R. Speare., R. Daszak., D. E. Green., A. A. Cunningham., C. L. Goggin., R. Slocombe., M. A. Ragan., A. D. Hyatt., K. R. Mc Donald., H. B. Hines., K. R. Lips., G. Marantelli & H. Parks.** 1998. Chytridiomycosis: A new disease of wild and captive amphibians ANZCCART Newsletter 11(4):1-3.
- Boistel, R., S. Grosjean. & S. Lötters.** 2005. Tadpole of *Atelopus franciscus* from French Guyana, with comments on other larvae of the genus (Anura: Bufonidae). *Journal of Herpetology* 39(1):148-153.
- Bolívar, W. & J. H. Restrepo.** 2004. Sapito arlequín de Malvasa. *Atelopus eusebianus*. Pp. 185-188. *In:* Rueda J. V, J. D. Lynch & A. Amézquita (eds), 2004 Libro Rojo de los Anfibios de Colombia. Serie de Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Conservation International. Instituto de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Colombia, Ministerio del Medio Ambiente. Bogotá, Colombia, 384 pp.
- Cochran, D. M. & C. J. Goin.** 1970. Frogs of Colombia. U.S. National Museum Bulletin, (288) xii: 655 pp.
- Collins, J. P. & T. Halliday.** 2005. Forecasting changes in amphibian biodiversity: aiming at a moving target. *Phil. Trans. R. Soc. B.* doi: 10.1098/rstb.2004.1588.
- Gray, P. & D. C. Cannatella.** 1985. A new species of *Atelopus* (Anura, Bufonidae) from the Andes of northern Perú. *Copeia*. 9:10-17.
- Grosjean, S.** 2001. The tadpole of *Leptobrachium (Vibrissaphora) echinatum* (Amphibia, Anura, Megophryidae). *Zoosystema* 23: 143-156.
- Hanselmann, R., A. Rodríguez, M. Lampo, L. Fajardo-Ramos, A. A. Aguirre, A. M. Kilpatrick, J. P. Rodríguez & P. Daszak.** 2004. Presence of an emerging pathogen of amphibians in introduced bullfrogs *Rana catesbeiana* in Venezuela. *Biological Conservation*. 120:115-119.
- La Marca, E., K. Lips, S. Lötters, R. Puschendorf, R. Ibáñez, J. V. Rueda-Almonacid, R. Schulte, C. Marty, F. Castro, J. Manzanilla-Puppo, J. E. García-Pérez, F. Bolaños, G. Chaves, J. A. Pounds, E. Toral & B. E. Young.** 2005. Catastrophic population declines and extinctions in Neotropical harlequin frogs (Bufonidae: *Atelopus*). *Biotropica* 37 (2): 190-201.
- & S. Lötters. 1997. Monitoring of declines in Venezuelan *Atelopus* (Amphibia:Anura:Bufonidae). Pp. 207-213. *In:* Böhme, W. Bischoff, & T. Ziegler (eds.) Herpetologia Bonensis. Bonn Germany: Museum Alexander Koenig.
- Lavilla, E. O. & Vaira M.** 1997. Larva de *Melanophryniscus rubiventris rubiventris* (Vellard 1947) (Anura, Bufonidae). *Alytes* 1997, 15 (1): 19-25.
- Lötters, S.** 1996. The Neotropical toad Genus *Atelopus*, Checklist, Biology and Distribution. M Vences & Glaw Verlags GbR, Köln, Germany. 1-143 pp.
- , E. La Marca, S. Stuart, R. Gagliardo & M. Veith. 2004. A new dimension of current biodiversity loss? *Herpetotropicos* 1(3): 29-31.
- Lips, K. R.** 1999. Mass mortality and populations declines of anurans at an upland site in western. Panama. *Conservation Biology* 13: 117-125.
- , J. R. Mendelson III, A. Muñoz-Alonso, L. Canseco-Marquez. & D. G. Mulcahy. 2004. Amphibian population declines in montane southern Mexico: resurveys of historical localities. *Biol. Conserv.* 119: 555-64.
- Lynch, J. D.** 1986. Notes on the reproductive biology of *Atelopus subornatus*. *Journal of Herpetology* 20 (1): 126-129.
- . 1993. A new harlequin frog from the cordillera Oriental of Colombia (Anura: Bufonidae: *Atelopus*). *Alytes* 11 (3): 77-87.
- & W. Duellman. 1997. Frogs of the genus *Eleutherodactylus* in western Ecuador. Systematics, ecology, and biogeography. Univ. Kansas. Special Publ. 23:1-236.
- Merini-Viteri, A.** 2001. Análisis de posibles causas de las disminuciones de poblaciones de anfibios en los Andes de Ecuador. Tesis de Licenciatura, Pontificia Universidad Católica de Ecuador, Quito Ecuador.

- Myers, C. W. & W. E. Duellman.** 1982. A new species of *Hyla* from Cerro Colorado, and other tree frog records and geographical notes from western Panama. *Am. Mus. Nov.*, (2752): 1-32.
- Mijares-Urrutía, A.** 1998. Los renacuajos de los anuros (Amphibia) altoandinos de Venezuela: Morfología externas y claves. *Revista de Biología Tropical* 46(1): 119-143.
- Osorno, M. & M. C. Ardila.** 2004 a. Sapito arlequín de Gachalá. *Atelopus pedimarmoratus*. Pp, 193-197. In: Rueda J. V, J. D. Lynch & A. Amézquita (eds). 2004. Libro Rojo de los Anfibios de Colombia. Serie de Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Conservation International. Instituto de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Colombia, Ministerio del Medio Ambiente. Bogotá, Colombia, 384 pp.
- Osorno, M. & M. C. Ardila.** 2004 b. Sapito arlequín de Serna. *Atelopus sernai*. Pp, 198-201. In: Rueda J. V, J. D. Lynch & A. Amézquita (eds). 2004. Libro Rojo de los Anfibios de Colombia. Serie de Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Conservation International. Instituto de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Colombia, Ministerio del Medio Ambiente. Bogotá, Colombia, 384 pp.
- Osorno, M. & M. C. Ardila.** 2004 c. Sapito arlequín vientre fuego. *Atelopus subornatus*. Pp, 202-205. In: Rueda J.V, J. D. Lynch & A. Amézquita (eds). 2004. Libro Rojo de los Anfibios de Colombia. Serie de Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Conservation International. Instituto de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Colombia, Ministerio del Medio Ambiente. Bogotá, Colombia, 384 pp.
- & **P. M. Ruiz.** 2001. Tres nuevas especies del género *Atelopus* A. M. C. Duméril & Bibron 1841 (Amphibia: Bufonidae) de las partes altas de la cordillera Oriental Colombiana. *Caldasia* 23(2): 509-522.
- Rachowicz, L.** 2002. Mouthpart pigmentation in *Rana muscosa* tadpoles: seasonal changes without Chytridiomycosis. *Herpetological Review*. 33.
- Ron, S.R., W.E. Duellman, L.A. Coloma & M.R. Bustamante.** 2003. Population decline of the Jambato toad *Atelopus ignescens* (Anura:Bufonidae) in the andes of Ecuador. *Journal of Herpetology* 37(1): 116-126.
- Rueda, J. V. & J. M. Hoyos.** 1991. *Atelopus muisca* nueva especie de anfibio (Anura: Bufonidae) para el Parque Nacional Natural Chingaza, Colombia. *Trianea. Acta Científica Técnica INDERENA*. 4: 471-480.
- & **J. N. Rueda.** 2004. Sapito arlequín de Alban. *Atelopus farci*. Pp, 117-121. In: Rueda J. V, J. D. Lynch & A. Amézquita (eds). 2004. Libro rojo de los Anfibios de Colombia. Serie de Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Conservation International. Instituto de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Colombia, Ministerio del Medio Ambiente. Bogotá. Colombia 384 pp.
- Stuart, S. M., J. S. Chanson, N. A. Cox, B. E. Young, A. S. L. Rodriguez, D. L. Fischman & R. W. Waller.** 2004. Status and trends of amphibians declines and extinctions worldwide. *Science* 306: 1783-1786.
- Vélez, C. M. & P. M. Ruiz.** 1997. Una nueva especie de *Atelopus* (Amphibia: Anura: Bufonidae) de la cordillera Central de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales* 21(81): 555-563.
- Young, B. E., K. E. Lips, J. K. Reaser, R. Ibáñez, A.W. Salas, J. R. Cedeño, L. A. Coloma, S. Ron, E. La Marca, J. R. Meyer, A. Muñoz, F. Bolaños, G. Chaves & D. Romo.** 2001. Population declines and priorities for amphibian conservation in Latin America. *Conservation Biology* 15:1213-23.
- , **S. N. Stuart, J. S. Chanson, N. A. Cox & T. M. Boucher.** 2004. Joyas que están desapareciendo: el estado de los anfibios en el Nuevo Mundo. NatureServe, Arlington, Virginia.
- Weldon, C., L. H. du Preez., A. D. Hyatt, R. Muller & R. Speare.** 2004. Origin of the amphibian chytrid fungus. *Emerging Infectious Diseases* 10(12): 2100-2105.

Recibido el 2 de febrero de 2006

Aceptado para su publicación el 10 de abril de 2006.

APROXIMACIÓN AL CONOCIMIENTO DE LOS ANFIBIOS EN UNA LOCALIDAD DEL MAGDALENA MEDIO (DEPARTAMENTO DE CALDAS, COLOMBIA)

por

Andrés R. Acosta-Galvis*, Carolina Huertas-Salgado*, Marco Rada*

Resumen

Acosta-Galvis, A., C. Huertas-Salgado & M. Rada: Aproximación al conocimiento de los anfibios en una localidad del Magdalena medio (Departamento de Caldas, Colombia). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **30** (115): 291-303. 2006. ISSN 0370-3908.

Como resultado de los trabajos de campo desarrollados entre septiembre de 2003 y diciembre de 2004, orientados a evaluar la composición de los ensamblajes de anfibios en la Reserva Natural Privada Riomanso, en el departamento de Caldas. Se registran 30 especies de anfibios distribuidas en tres órdenes, constituyéndose en una de las localidades con mayor diversidad en el valle medio del río Magdalena. Se resalta la existencia de nueve especies con distribuciones restringidas para esta área, e igualmente, a partir de la diversidad de anfibios registrados para esta región, se deduce que el distrito "biogeográfico" de Nechí es un mosaico de faunas que se articulan de acuerdo al tipo de vegetación, humedad y altitud.

Palabras clave: Amphibia, Distribución, Ensamblaje.

Abstract

During the field work, between September of 2003 and December of 2004, to evaluate the composition of amphibian assemblages in the private Natural Reservation Riomanso, in the department of Caldas, we registered 30 species of amphibians distributed in three orders, which constitutes one of the localities with more diversity in the interior of the Magdalena valley. The presence of nine species with restricted distributions to the Magdalena Valley is notable. The diversity of amphibians for this region indicates that the biogeographical district of Nechí is a mosaic of faunas that are articulated according to the vegetation type, humidity and altitude.

Key words: Amphibia, Assemblages, Distribution.

* Laboratorio de Herpetología, Pontificia Universidad Javeriana. Correos electrónicos: andres.acosta@javeriana.edu.co; chuertas@cable.net.co; radamarco@hotmail.com

Introducción

Constituyéndose como una pequeña porción de la región transandina, el valle del río Magdalena está enclavado en las estribaciones occidentales y orientales de las cordilleras Oriental y Central de Colombia; señalándola como una de las zonas de las tierras bajas con notables mosaicos ecosistémicos. **Hernández et al.** (1992) enmarcan parte de esta región (=enclaves húmedos) al interior de la “provincia biogeográfica Chocó-Magdalena” al interior del distrito “biogeográfico” Nechí basado en entidades biológicas asociadas con selva húmeda cálida y localizadas en las regiones piemontanas de las cordilleras que lo encierran, anotando que su límite sur se extiende hasta la región de Mariquita. Sin embargo, evidencia reciente nos orienta a que probablemente esta región se extiende hasta el Sur del Tolima (Chaparral). Por otra parte, estos mismos autores circunscriben el “distrito biogeográfico del Tolima” (provincia geográfica Norandina), en aquellos enclaves secos contiguos al río Magdalena (medio y alto Magdalena) en los departamentos de Cundinamarca, Huila y Tolima.

Hasta el año 2006 han sido registradas en la literatura 731 especies de anfibios para el país, donde dos áreas geográficas, la región andina y el trapecio Amazónico, han sido sujetas parcialmente a estudios sistemáticos; mientras que el conocimiento científico de la fauna Amphibia en el valle medio del Magdalena es aún muy fragmentario especialmente en áreas de coberturas de vegetación selvática y en algunos enclaves secos por debajo de los 1000m que se encuentran adyacentes a las cordilleras.

Los trabajos relativos al conocimiento de la fauna Amphibia en el valle del Magdalena por altitudes debajo de 1000m, han sido restringidos a listas de especies, revisiones taxonómicas que incluyen la descripción de nuevas especies y la ampliación de las distribuciones de las ya conocidas.

Stebbins & Hendrickson (1959) realizan una primera aproximación a la descripción de los anfibios en el valle del Magdalena registrando 10 especies distribuidas en 5 familias en localidades pertenecientes a los departamentos de Huila y Tolima. **Cochran & Goin** (1970) registran algunas especies en localidades dispersas en los departamentos de Cundinamarca, Santander y Tolima. **Silvertone** (1975) en su revisión de los anuros del género *Dendrobates* registra una especie para el valle de Magdalena colombiano (*D. truncatus*). **Kluge** (1979) con el estudio de las “ranas gladiatoras” reconoce la distribución de dos especies (*Hypsiboas crepitans* e *H. pugnax*) en algunas localidades de la región. **Heyer** (1978) describe

en su estudio sistemático del grupo *fuscus* de *Leptodactylus* la presencia de *Leptodactylus labialis* (= *L. fragilis*) y *L. fuscus* en esta zona; **Lynch & Myers** (1983) incluyen algunos registros de tres especies de *Eleutherodactylus* del grupo *fitzingeri* en algunas localidades de Magdalena medio; **Lynch** (1989) en su revisión de *Pseudopaludicola* registra *P. pusilla* con una amplia distribución en la región Caribe y dos localidades conocidas para el valle del Magdalena; **Ruiz & Lynch** (1995) describen dos especies de *Cochranella* con distribuciones inferiores a los 1000 m en los enclaves húmedos de la cordillera Central de Colombia. **Ruiz et al.** (1996) hacen implícitas 37 especies con distribuciones asociadas al valle del Magdalena; **Ruiz-Carranza & Lynch** (1997) realizan una revisión de los centrolénidos de un perfil de la vertiente oriental de la cordillera Central, incluyendo una especie por debajo de los 1000 m y establecen que para el valle medio del Magdalena existen registros de cuatro especies. **Lynch & Ardila** (1999) en su artículo de los *Eleutherodactylus* del complejo *taeniatus* registran dos especies (*E. taeniatus* y *E. viejas*) con distribuciones en la región del Magdalena; **Lynch & Rueda** (1999), en su descripción de un perfil en el flanco oriental del Departamento de Caldas, consideran la presencia de cerca de nueve especies del género *Eleutherodactylus* entre los 600 y 1600 m. **Duellman** (2000), en su revisión de los Hylidae de Centroamérica amplían la distribución de varias especies (*Hyla palmeri*, (= *Hyloscirtus palmeri*) *Phyllomedusa venusta*, *Scinax boulengeri* y *Smilisca sila*) en algunas localidades en el Valle medio del Magdalena. **Vélez** (2000) amplía la distribución de *Bufo sternosignatus* (*Bufo* gr. *typhonius*) a la región del Magdalena medio entre los 400-1700m; **Lynch** (2000) en su “aproximación a las culebras ciegas de Colombia” registra seis especies de cecilias (*Gymnophiona*) con distribuciones asociadas a esta región; **Nieto** (2000) en su “resumen” de las ranas arborícolas pertenecientes al género *Scinax* (*Anura*: Hylidae) resalta la presencia de tres especies para la zona. **Lynch** (2001) en su publicación de las ranas del grupo *diastema* (Género *Eleutherodactylus*) describe una nueva especie (*E. anthrax*) para el municipio de Samaná a 700 m. **Acosta & Restrepo** (2001) describen, para el área del río de La Miel en el departamento de Caldas, una especie de salamandra (*Bolitoglossa lozanoi*); **Lynch & Suárez** (2001) describen los patrones de distribución para las ranas gladiatoras del género *Hyla* actualmente *Hypsiboas* (*H. boans*, *H. crepitans* e *H. pugnax*) en algunas localidades en el valle del Magdalena. Estos mismos autores en el 2004, en su revisión preliminar de los Anfibios del Chocó Biogeográfico, registran 37 especies de anfibios con distribuciones asociadas al “distrito biogeográfico Nechí”. **Grant** (2004) en su trabajo sobre el estatus taxonómico

de *Colostethus inguinalis* señala que esta especie es considerada el segundo dendrobátido más común a las regiones del Magdalena y el Chocó.

Esta contribución nos permite describir de una manera preliminar, la diversidad de los anfibios en una localidad, en el Valle del Magdalena con 30 especies.

Materiales y métodos

Los ejemplares fueron recolectados por los autores durante el desarrollo de varias salidas de campo a la Reserva Natural Privada Riomanso, Departamento de Caldas, Municipio la Dorada, Vereda San Roque a una altitud entre los 240-280 m (Figura 1). Se trabajó en diferentes temporadas climáticas, entre los meses de septiembre de 2003 y noviembre de 2004 (Figura 2). Las recolecciones se realizaron en dos tipos de coberturas vegetales: bosque húmedo tropical con colinas ($5^{\circ} 39' N$ y $74^{\circ} 46' W$) y zonas abiertas (pastizales) ($5^{\circ} 40' N$ y $74^{\circ} 47' W$). Los ejemplares fueron recolectados y registrados mediante el método de encuentro visual (VES) y por remoción. Se realizaron muestreos entre las 6 y las 16 horas para la recolección de especies de actividad diurna y las 18:30 y las 22 horas para la captura de especies de actividad nocturna. La preservación de los ejemplares adultos se realizó en etanol al 70% y las larvas en una solución de formaldehído al 10%. Los ejemplares examinados fueron 304 especímenes depositados en dos colecciones de referencia registradas: Colección Biológica de Anfibios y Reptiles de la

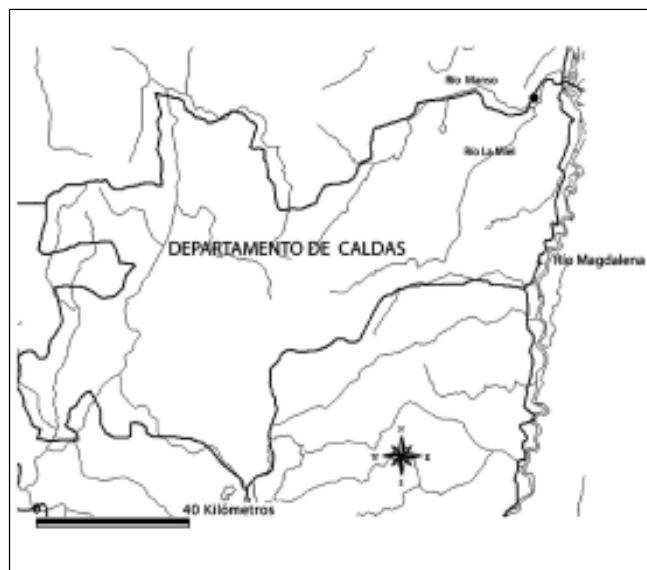


Figura 1. Localización de la Reserva Riomanso al oriente del departamento de Caldas. El punto negro indica la localidad exacta.

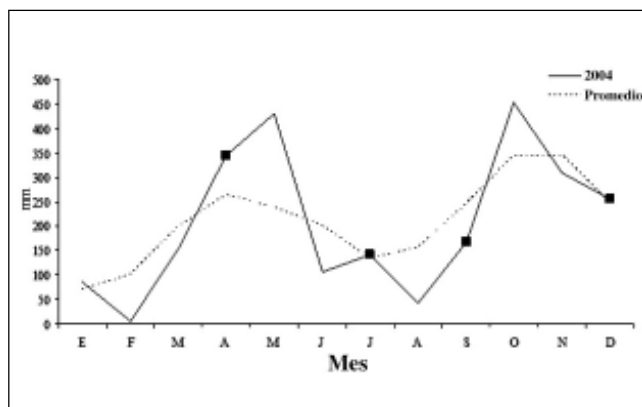


Figura 2. Precipitación promedio y del año 2004 del área de Influencia del Riomanso; los cuadros negros indican las épocas de muestreo.

Pontificia Universidad Javeriana, Museo Javeriano de Historia Natural (MUJ-MJHN) y Colección de Anfibios Universidad Nacional de Colombia-Instituto de Ciencias Naturales (ICN-MHN).

Resultados. Especies relacionadas

Orden Anura. Familia Bufonidae

Bufo granulosus Spix, 1824

Con una amplia distribución en el país esta especie fue registrada por **Stebbins & Hendrickson** (1959) para el valle del Magdalena en dos localidades correspondientes a los departamentos de Huila y Tolima entre los 400-450 m. **Cochran & Goin** (1970) registran algunos ejemplares en localidades de Cundinamarca (Tocaima) y Tolima (Melgar y Mariquita) como *Bufo granulosus humboldti*. **Ruiz et al.** (1996) hacen implícita la presencia de las dos subespecies en la región del Caribe. **Acosta** (2000) reconoce una sola especie con amplia distribución en el país, con registros para el valle del Magdalena en los departamentos de Antioquia, Boyacá, Caldas, Cundinamarca, Huila y Tolima entre los 0-1500 m. Los ejemplares MUJ 2951-2953, MUJ 2997, MUJ 3276-3286 fueron recolectados en charcas temporales de pastizales abiertos. Se encontraron vocalizando durante la transición de la estación seca a la lluviosa. Una pareja amplectante MUJ 3282-3283 fue encontrada al borde de las charcas sobre el barro, el macho estaba vocalizando sobre la hembra.

Bufo haematiticus Cope, 1862

Cochran & Goin (1970) registran esta especie para el valle del río Magdalena en una sola localidad pertene-

ciente al municipio de Rionegro en el departamento de Santander. **Ruiz et al.** (1996) la registran para el valle del Magdalena en la vertiente oriental de la cordillera Central entre los 75 y 1000 m. **Acosta** (2000) la registra para toda la cuenca en el valle del Magdalena en los departamentos de Antioquia, Boyacá, Caldas, Cundinamarca y Santander. Un solo ejemplar juvenil fue capturado a la orilla del Riomanso.

Bufo marinus (Linnaeus, 1758)

Especie con amplia distribución en el país, ha sido registrada por varios autores para gran parte del territorio nacional (por debajo de 2100 m). Fue observada y recolectada en zonas de pastizales abiertos; algunos de los ejemplares fueron recolectados lejos de los cuerpos de agua y otros fueron registrados vocalizando a la orilla del Riomanso en cobertura protectora de cauce (MUJ 2954-2955). Algunos renacuajos fueron recolectados en charcas estacionales (MUJ 3104).

Bufo* gr. *typhonius

Considerado por muchos autores como un complejo de especies, los ejemplares recolectados corresponden a *Bufo* gr. *typhonius* en el valle del Magdalena. El estatus taxonómico es aún incierto. **Cochran & Goin** (1970) registran esta especie como *Bufo typhonius* en los departamentos de Cundinamarca, Santander y Tolima. **Ruiz et al.** (1996) la reconocen, igualmente, como *B. typhonius* registrándola para el valle de Magdalena hasta los 1900 m. **Vélez** (2000) la registra como *Bufo sternosignatus* en los departamentos de Caldas, Cundinamarca, Huila y Tolima entre los 400 y 1700 m. Los ejemplares recolectados fueron observados al interior del bosque sobre el piso y cerca a las quebradas (MUJ 2998-3005, MUJ 3246).

Familia Centrolenidae

Hyalinobatrachium fleischmanni (Boettger, 1893)

Cochran & Goin (1970) denominan esta especie bajo el nombre *Centrolenella fleischmanni* para la frontera colombo-panameña (sin registros en el país). **Ruiz & Lynch** (1991) en su revisión de la clasificación supraespecífica de la familia Centrolenidae introducen a esta especie bajo el corte nomenclatural de *Hyalinobatrachium*. **Ruiz et al.** (1996) la registran para el valle medio del Magdalena entre los 60 y 460 m. **Ruiz & Lynch** (1997) no registran esta especie en el departamento de Caldas, sin embargo, predicen su distribución en este departamento. En la reserva Riomanso se han recolectado varios ejemplares (MUJ 3021-3026, 3089-3090). La especie ha sido observada al interior del bosque sobre la vegetación adyacente a los

cuerpos de agua. Se observaron más de 25 machos vocalizando durante la época de lluvias y algunas posturas.

Familia Dendrobatidae

Colostethus inguinalis (Cope, 1868)

Grant (2004) registra esta especie para el valle medio del Magdalena. El registro aquí presentado corresponde a la localidad más al sur de esta región. Los ejemplares MUJ 3027-28, MUJ 3418-3420 fueron colectados durante el mes de septiembre tanto en el 2003 como en el 2004; un ejemplar (MUJ 3247) fue registrado en el mes de abril y los ejemplares MUJ 3366 y 3367 durante el mes de julio de 2004. Los individuos recolectados se encontraron asociados a rocas de la orilla de quebradas de curso lento. La especie ha sido observada vocalizando en las primeras horas de la mañana.

***Allobates* sp.**

Identificada como una especie perteneciente al grupo *trilineatus* (**Grant com pers.**) fue registrada por primera vez en tres localidades del Magdalena medio en los departamentos de Antioquia, Boyacá y Santander con la captura de pocos ejemplares adultos. Para la Reserva Riomanso la especie es común durante la estación lluviosa, época en la cual fue recolectada al interior del bosque. Se registró actividad diurna por la vocalización de machos en septiembre de 2004 entre las 6:30-8:30 horas. Es abundante en la hojarasca cercana a cuerpos de agua siendo simpátrica con *C. inguinalis*.

Dendrobates truncatus (Cope, 1861 "1860")

Stebbins & Hendrickson (1959) registran esta especie como *Dendrobates lugubris* (= *Phyllobates lugubris*) de Chaparral en el Departamento del Tolima a 700 m. **Cochran & Goin** (1970) la citan bajo el mismo nombre a lo largo de varias localidades en Antioquia, Bolívar, Caldas, Cundinamarca, Magdalena, Santander y Tolima. **Silverstone** (1975) la reseña como una especie de amplia distribución entre los 100-1130 m a lo largo del valle de Magdalena. Este autor revisa material proveniente de Antioquia (Puerto Berrio), Boyacá (Muzo), Cundinamarca (cerca al Boquerón en los límites Cundinamarca-Tolima), Santander (cuatro localidades) y siete localidades en el departamento del Tolima con el registro más al sur en el municipio de Chaparral. **Ruiz et al.** (1996) & **Acosta** (2000) la registran al interior de la cuenca del río Magdalena y la región Caribe. Para la reserva Riomanso esta especie es común, fue recolectada principalmente en la cobertura boscosa durante el día entre las 8:00 y las 16:00 horas, generalmente en la hojarasca. Fueron recolectados

ocho ejemplares adultos (MUJ 3008-3015) y algunas larvas (MUJ 3088) en diferentes estadios de desarrollo. La presencia de estas larvas en charcas temporales al interior del bosque indica que probablemente los adultos utilizan estos cuerpos de agua, para el desarrollo de sus renacuajos. La especie se observó a lo largo de todo el año.

Familia Hylidae

Dendrosophus microcephalus (Cope, 1866)

Esta especie es considerada de amplia distribución en las tierras bajas de la región Caribe y Valle del Magdalena. Históricamente ha sido registrada para el valle del Magdalena por **Stebbins & Hendrickson** (1959) quienes la registran en el municipio de Villa Vieja en el departamento del Huila y por **Cochran & Goin** (1970) quienes amplían la distribución a los departamentos de Cundinamarca, Santander y Tolima. **Ruiz et al.** (1996) la registran para todo el valle del Magdalena y **Acosta** (2000) aumenta al registro altitudinal entre los 0 y 500 m. Ejemplares examinados en la colecciones de referencia de la Pontificia Universidad Javeriana amplían este registro a 1100 m en el departamento del Tolima (MUJ 2381-2388). Para la reserva Riomanso, los ejemplares MUJ 3233-3243, 3344-3357 fueron recolectados en zonas abiertas, generalmente en charcas permanentes, vocalizando sobre vegetación emergente. La especie ha sido observada durante todo el año, siendo más abundante durante la estación lluviosa.

Hypsiboas boans (Linnaeus, 1758)

Considerada en la actualidad como una especie de amplia distribución en el país. **Ruiz et al.** (1996) & **Acosta** (2000) la señalan para toda el área del Magdalena medio por debajo de los 500 m. **Lynch & Suárez** (2001) restringen su distribución a los departamentos de Antioquia, Boyacá, Caldas, Cundinamarca y Santander en el Magdalena medio entre los 180-970 m. Para la reserva Riomanso fue observada únicamente al interior de coberturas de vegetación de bosque húmedo (MUJ 2936-2937, MUJ 3268-3269). Un nido observado fue construido en medio de la quebrada y presenta una conformación que protege las posturas. Los ejemplares adultos fueron recolectados en los meses de septiembre de 2003 y una postura fue recolectada en el mes de julio de 2004.

Hypsiboas crepitans (Wied-Neuwied, 1824)

Stebbins & Hendrickson (1959) registran esta especie para el departamento del Huila. **Cochran & Goin** (1970) presentan registros en el valle del Magdalena para los departamentos de Antioquia, Cundinamarca, Santander y Tolima. **Kluge** (1979) adiciona registros para el departa-

mento de Boyacá al interior del valle del Magdalena. **Ruiz et al.** (1996) & **Acosta** (2000) la registran con amplia distribución en las tierras bajas de Colombia entre 0 y 1700 m. **Lynch & Suárez** (2001) la registran para el Valle de Magdalena en los departamentos Caldas, Cundinamarca, Huila y Santander. *Hypsiboas crepitans* ha sido recolectada en la reserva Riomanso (MUJ 2947-2950) sobre vegetación arbustiva asociada a pastizales abiertos, en el ecotono pastizal-bosque y al interior del bosque donde es simpátrica con *Hypsiboas boans*. Esta especie fue observada durante todo el año.

Hypsiboas pugnax (Schmidt, 1857)

Kluge (1979) la registra en el valle del río Magdalena en los departamentos de Antioquia, Boyacá, Cundinamarca, Santander y Tolima. **Ruiz et al.** (1996) amplían su distribución a lo largo de todo el valle del Magdalena y **Acosta** (2000) la considera una especie de distribución restringida a las tierras bajas y la reporta entre los 0 y 500 m. **Lynch & Suárez** (2001) registran esta especie con una amplia distribución en el valle del Magdalena por debajo de los 500 m. Es una especie exclusiva de zonas abiertas, se asocia principalmente a los cuerpos de agua. Puede ser hallada vocalizando en el piso, sin embargo algunos ejemplares utilizan la vegetación arbustiva, ca. 1 m de altura, para vocalizar. El amplexo, ha sido observado en el piso y sus larvas se desarrollan en charcas estacionales. Los ejemplares fueron recolectados a lo largo del año y al interior de las charcas; es una de las especies más comunes, su pico de actividad es prolongado, entre las 18:30- 4:00 horas. Los ejemplares capturados corresponden a MUJ 2938-2946, MUJ 3216-3219, MUJ 3270-3275, MUJ 3312.

Hyla vigilans Solano, 1971

Descrita originalmente por **Solano** (1971) para Venezuela. Solo hasta 1996 **Ruiz et al.** la registran por primera vez para Colombia en el valle del Magdalena medio y la región Caribe en altitudes inferiores a 200 m. Los ejemplares recolectados (MUJ 3055-3061) durante el desarrollo del trabajo en el Riomanso constituyen uno de los registros más al sur de la especie en el Valle del Magdalena. La especie fue recolectada sobre vegetación emergente de charcas efímeras en la estación lluviosa y muy pocos ejemplares en charcas permanentes.

Phyllomedusa venusta Duellman & Trueb, 1967

Descrita por **Duellman & Trueb** (1967) para la provincia del Darién en Panamá y reportada para el Darién colombiano por **Ruiz et al.** (1996). **Acosta** (2000) la registra en el valle del Magdalena para los departamentos de Boyacá y Tolima. **Duellman** (2000) registra la especie

entre los 300 y 1200 m. Los ejemplares recolectados en el Riomanso (MUJ 2889, 2933-2935) constituyen el primer registro de la especie para el departamento de Caldas. Fueron recolectados en la estación lluviosa en los meses de julio y septiembre generalmente asociados a cobertura boscosa y a zonas de transición en vegetación arbustiva con charcas permanentes, cerca de cuerpos de agua. Ha sido observada vocalizando en las horas de la noche.

Scinax rostratus (Peters, 1863)

Ruiz et al. (1996) registran esta especie en los valles de los ríos Cauca y Magdalena y los Llanos de Colombia. **Nieto** (2000) la considera una especie de amplia distribución y la registra en los departamentos de Antioquia, Cundinamarca y Santander entre los 30-1100 m. Para el área del Riomanso es considerada una especie rara que generalmente aparece durante la transición de la estación seca y lluviosa. Ha sido observada y recolectada vocalizando en la noche sobre las hojas de palmas cerca a charcas permanentes (MUJ 3304-3311); un solo ejemplar fue recolectado en vegetación emergente, en charcas efímeras (MUJ 3007).

Scinax ruber (Laurenti, 1768)

Considerada como una especie de amplia distribución en el país. **Stebbins & Hendrickson** (1959) la señalan como *Hyla rubra* en Carmen de Apicalá en el departamento del Tolima. **Cochran & Goin** (1970) bajo el mismo corte nomenclatural amplían su registro para la región en los departamentos de Boyacá, Caldas, Cundinamarca, Huila, Santander y Tolima. **Ruiz et al.** (1996) la consideran de amplia distribución por encontrarse a lo largo del valle del Magdalena y **Nieto** (2000) la registra altitudinalmente entre los 0-1100 m. *S. ruber* (MUJ 3017-3020, 3062-3075) es una especie de ambientes intervenidos que vocaliza oculta al interior la vegetación arbustiva y los pastizales. Es activa principalmente en la estación lluviosa, cuando muestra su mayor actividad reproductiva (renacuajos MUJ 3099, MUJ 3296-3301).

Scinax x-signatus (Spix, 1824)

Nieto (2000) considera que la especie es de amplia distribución entre los 40-2200 m. Para el valle del Magdalena la especie ha sido registrada en los departamentos de Antioquia, Boyacá, Caldas, Cundinamarca, Huila, Santander y Tolima. El estatus taxonómico de esta especie frente a *S. ruber* es confuso; la revisión de caracteres de las vocalizaciones, datos moleculares y morfológicos de la osteológica de adultos y larvas nos podrían orientar sobre su definición taxonómica. Los

ejemplares fueron recolectados vocalizando sobre el sustrato y a 10 m de distancia de los cuerpos de agua (MUJ 3425-3426).

Familia Leptodactylidae

Eleutherodactylus anthrax Lynch, 2001

Lynch (2001) describió esta especie del grupo *diastema* para los bosques húmedos del Magdalena medio. Siendo conocida únicamente por dos ejemplares: uno proveniente de su localidad típica en Samaná (Caldas) a 700 m y una hembra del municipio de San Rafael en Antioquia a 1200 m. Los ejemplares aquí registrados (n=3) constituyen el tercer registro de la especie en el país ampliando su distribución a los bosques húmedos tropicales a 280 m en el municipio de la Dorada cerca de su localidad típica, macho adulto MUJ 3267 (LRC 17,8 mm) MUJ 3538 (LRC 17,8 mm) y MUJ 3539 (LRC 16,6 mm). Por otra parte, un ejemplar adicional proveniente del municipio de San Luis (Antioquia) a 420 m MUJ 2830 (LRC 16,3 mm) es conocido, para esta especie en el valle del Magdalena. **Lynch** (2001) señala que los ejemplares recolectados provienen de bosques remanentes de la cordillera Central aspecto que se confirma con los ejemplares aquí estudiados. En la reserva Riomanso se hallaron machos vocalizando entre las 10:00 y las 11:00 horas al interior del bosque a una altura entre 2 y 3 m sobre sustrato y sobre hojas de platanillo (*Heliconia* spp.) (MUJ 3538) y al interior de la corteza de un árbol (MUJ 3539) sobre una hoja de palma (MUJ 3267).

Eleutherodactylus raniformis (Boulenger, 1896)

Cochran & Goin (1970) registran esta especie para el valle medio del río Magdalena en cuatro localidades en los departamentos de Antioquia (Puerto Berrío), Cundinamarca (Tocaima), Santander (El Centro) y Tolima (Mariquita); **Lynch & Myers** (1983) en su revisión del grupo *fitzingeri* examinan ejemplares de las mismas localidades evaluadas por **Cochran & Goin** (1970); **Ruiz et al.** (1996) lo registran con una amplia distribución en las zonas húmedas de la región trasandina. **Lynch & Rueda-Almonacid** (1999) en una localidad de Caldas la nombran para altitudes entre 600 y 1600 m. Ha sido recolectada al interior del bosque (MUJ 3076-3083) y en la cobertura protectora de cauce de las zonas abiertas (MUJ 3368). Los ejemplares se encontraban vocalizando al momento de la captura a las 20:00 horas.

Eleutherodactylus taeniatus (Boulenger, 1912)

Ruiz et al. (1996) la registran para el Magdalena medio en las franjas de bosque húmedo de las vertientes de

la cordillera Central y Oriental. **Lynch & Ardila** (1999) incluyen algunas localidades para el valle del Magdalena medio en los departamentos de Antioquia, Caldas y Tolima hasta los 1500 m. **Lynch & Rueda-Almonacid** (1999) anotan que esta especie se encuentra con otras seis especies del mismo género entre los 600 y 1600 m en el departamento de Caldas. El ejemplar recolectado MUJ 3543 se encontraba vocalizando a 2 m del piso sobre vegetación en la transición entre las zonas abiertas y el bosque a las 18:00 horas.

Leptodactylus insularum Barbour, 1906

Stebbins & Hendrickson (1959) registran esta especie únicamente para el departamento del Huila (Villa Vieja). **Cochran & Goin** (1970) la citan como *L. insularum* para los departamentos de Cundinamarca, Santander y Tolima. **Ruiz et al.** (1996) comentan un estatus taxonómico incierto entre *L. bolivianus* y *L. insularum*; adicionalmente la registran en el departamento del Tolima. **Acosta** (2000) amplía su distribución en el valle medio del Magdalena (bajo el nombre de *L. bolivianus*) en los departamentos de Cundinamarca, Caldas y Santander hasta los 500 m. En la reserva Riomanso el ejemplar recolectado (MUJ 3016) estaba en pastizales de zonas abiertas.

Leptodactylus fuscus (Schneider, 1799)

Especie con amplia distribución en las tierras bajas de Colombia. **Stebbins & Hendrickson** (1959) registran esta especie en el valle del Magdalena para los departamentos de Huila (Villa Vieja) y Tolima (Chaparral). **Cochran & Goin** (1970) señalan novedades en la distribución en esta región para los departamentos de Antioquia (Sonsón, Villa Arteaga), y Cundinamarca (Cambao, Puerto Salgar, Tocaima). **Ruiz et al.** (1996) y **Acosta** (2000) establecen que su distribución abarca las regiones Andina, Amazonia, Orinoquia y Caribe en un rango altitudinal entre 0 y 1500 m. *L. fuscus* ha sido recolectada en la reserva Riomanso (MUJ 3244, 3331-3333) en pastizales y charcas temporales en donde es simpátrica con otros integrantes del género *Leptodactylus* como *L. fragilis* y *L. insularum*.

Leptodactylus fragilis (Brocchi, 1877)

Ruiz et al. (1996) registran esta especie como *L. fragilis* para las tierras bajas del valle medio del río Magdalena. **Acosta** (2000) la registra para todo el valle del Magdalena medio hasta los 1000 m. Los ejemplares recolectados en la reserva Riomanso (MUJ 3054, 3231-3232, 3245, 3287-3295) se encontraron vocalizando en las charcas permanentes de los pastizales, en las cuales utilizan huecos en el barro para cantar entre las 17:30 y las 23:30 horas, fue recolectada durante todo el año.

Leptodactylus savagei Heyer, 2005

Conocida bajo el nombre de *Leptodactylus pentadactylus* **Cochran & Goin** (1970) registran esta especie para el alto Magdalena en el departamento del Huila (Pitalito a 1350 m de altitud). Así mismo, **Heyer** (1979) la registra (bajo el corte nomenclatural de *L. pentadactylus*) en los departamentos de Antioquia, Boyacá, Caldas, Cundinamarca, Huila, Santander y Tolima entre los 0-900 m; **Ruiz et al.** (1996) no hacen explícitos los registros para el Valle del Magdalena (que puede incluir *Leptodactylus pentadactylus*, *L. rhodomerus* y *L. savagei sensu* Heyer, 2005). **Heyer** (2005) describe *Leptodactylus savagei* con una distribución restringida en los departamentos de Antioquia (Chigorodó) y Magdalena (área de Santa Marta) entre los 0-680. Los ejemplares aquí estudiados (MUJ 2931-2932) corresponden a la ampliación de su registro en el valle medio del Magdalena. Prefiere el sotobosque con colinas cercano a charcas al interior del bosque, generalmente se ocultan en huecos en el sustrato o bajo raíces y las posturas son colocadas en sitios húmedos; es conspicua durante la estación lluviosa.

Physalaemus pustulosus (Cope, 1864)

Cochran & Goin (1970) registran esta especie bajo el nombre de *Eupemphix pustulosus* para localidades de Antioquia, Cundinamarca, Santander y Tolima. **Ruiz et al.** (1996) y **Acosta** (2000) señalan una amplia distribución de esta especie para el valle del Magdalena hasta los 1400 m. En la reserva Riomanso (MUJ 3029-3052, 3105-3106, 3230-3230) esta especie ha sido recolectada en la cobertura boscosa donde se han registrado nidos de espuma, en el mes de septiembre de 2003, sobre cuerpos de agua de curso léntico. La especie también ha sido recolectada y observada activa en las charcas permanentes y estacionales de las zonas abiertas donde los machos vocalizan inmersos parcialmente al interior de los cuerpos de agua, aquí también se han encontrado nidos de espuma. Fue observada durante todo el año.

Pseudopaludicola pusilla (Ruthven, 1916)

Con una amplia distribución en las áreas secas de la región transandina fue descrita por Ruthven en 1916 en la región Caribe de Colombia. **Cochran & Goin** (1970) no registran la especie para el valle del Magdalena; **Lynch** (1989) revisa ejemplares provenientes de Puerto Wilches (Santander) y Honda (Tolima). **Ruiz et al.** (1996) la registran para el área del Magdalena medio. **Acosta** (2000) amplía los registros en los departamentos de Huila y Tolima en el alto Magdalena. En el Riomanso (MUJ 3318-3329, 3335-3343) fue observada en septiembre de 2003 asociada a pastizales.

Familia Microhylidae

Relictivomer pearsei (Ruthven, 1914)

A pesar de que **De Carvalho** (1954) establece las diferencias entre los géneros de microhílidos al norte de Sudamérica, basándose en la condición del prevomer. **Stebbins & Hendrickson** (1959) la reportan como *Elachistocleis ovalis* para el municipio de Villa Vieja (departamento de Huila); **Cochran & Goin**, 1970, **Ruiz et al.** (1996) y **Acosta** (2000) restringen esta especie (*E. ovalis*) a la región Caribe en Colombia. De acuerdo con **Lynch (com pers.)** *Elachistocleis ovalis* aunque registrada para la región Caribe y Magdalena de Colombia, parece estar restringida en las tierras bajas al oriente de los Andes. Los ejemplares recolectados fueron registrados durante la mitad del periodo de lluvias en septiembre de 2004, siendo hallados vocalizando en potreros inundados (MUJ 3423-24). Una pareja amplectante MUJ 3421-3422 fue hallada al borde de los cuerpos de agua en la cual el macho aún estaba vocalizando sobre la hembra. Las larvas fueron recolectadas en charcas efímeras asociados a pastizal en zonas abiertas (MUJ 3098 y MUJ 3397).

Orden Gymnophiona

Familia Caeciliidae

Caecilia thompsoni Boulenger, 1902

Lynch (2000) la registra con una amplia distribución en varias localidades en el valle del Magdalena entre los 300 y 1300 m. El ejemplar recolectado registró una longitud de 1550 mm, siendo el más grande conocido en el país. Fue capturado (MAR 191) al interior del bosque a las 19:00 horas durante la estación lluviosa.

Osaecilia polyzona (Fisher, 1879)

Ruiz et al. (1996) la registran para el norte de la cordillera Central en el departamento de Antioquia a 500 m con base en la descripción original de **Fisher** (1879). **Lynch** (2000), **Lynch & Suárez** (2004b) registran el segundo ejemplar en la región de Juradó en el Pacífico colombiano; **Lynch & Acosta** (2004) con base en 13 ejemplares coleccionados en área de la reserva del Riomanso amplían el conocimiento taxonómico y zoogeográfico de esta especie que prefiere sitios con colinas cercanos a pastizales abiertos, los ejemplares MUJ 3373-3377 fueron recolectados por remoción en lugares ricos en materia orgánica.

Parvicaecilia pricei (Dunn, 1944)

Esta caecilia descrita para el valle del Magdalena por **Dunn**, y considerada como una especie desconocida por

Lynch (2000), con una distribución atípica en las cuencas de los ríos Magdalena y Cauca. El ejemplar del Riomanso constituye el cuarto ejemplar conocido, capturado en la estación seca, asociado a la vega del río Manso, generalmente en suelo arenoso en cultivos de plátano. Presenta 101 surcos primarios y 19 secundarios y una coloración grisácea con punteaduras amarillas y la cabeza de color crema.

Orden Caudata

Familia Plethodontidae

Bolitoglossa lozanoi Acosta & Restrepo, 2001

Descrita originalmente para la cuenca del río La Miel en el departamento de Caldas, esta especie fue considerada de distribución restringida a su localidad típica. **Acosta** (2004) amplía la distribución a varias localidades en el valle del Magdalena medio. El registro es el segundo para el departamento de Caldas ampliando su distribución a los bosques asociados a planicie en el Valle del Magdalena.

Discusión

Al establecer una comparación (Tabla 1) de la fauna Amphibia del valle del Magdalena (<1000 m), con otras zonas de las tierras bajas es notable la existencia de algunos elementos restringidos para la región, entre los que podemos resaltar especies asociadas a enclaves húmedos como *Cochranella susatamai*, *Cochranella punctulata*, *Colostethus palmatus*, *Eleutherodactylus anthrax*, *Eleutherodactylus viejas*, *Caecilia thompsoni*, *Parvicaecilia nicefori* (con algunos registros en la cuenca del río Cauca) y *Bolitoglossa lozanoi* (Figura 3, 4 y 5) tres de las cuales registramos en esta contribución.

Los componentes de la fauna Amphibia que son considerados de amplia distribución están registrados en más de tres localidades, de las evaluadas, y se asocian generalmente al Chocó biogeográfico, a zonas con algún tipo de perturbación, ó a enclaves subhigrofiticos ó secos de la región Caribe y planicies del Alto Magdalena.

Un análisis comparativo (Tabla 1) de la fauna de anfibios de la "provincia biogeográfica" de Nechí (*sensu Lynch & Suárez*, 2004a & *Grant*, 2004) demuestra que algunos de los componentes registrados son exclusivos de la región norte y noroccidental de la cordillera Central y no penetran (=ausencia de registros) al valle del río Magdalena, este es el caso de especies como: *Scinax boulengeri* (**Cope**, 1877), *Scinax elaeochroa* (**Cope**, 1876) y *Eleutherodactylus gularis* (**Boulenger**, 1898). Los resultados obtenidos con el análisis de **Bray-Curtis** permi-

Tabla 1. Comparación de la fauna Amphibia de la Reserva Natural Riomanso con otras faunas aledañas 1. Refugio Nechí *sensu* Hernández *et al.* 1992 (Lynch & Suárez, 2004; Grant, 2004), 2. Valle del Magdalena (<1000m), 3. Riomanso, 4. Atlántico y Bolívar (Región Caribe) (Cuentas *et al.* 2002), 5. Urrá (norte de la cordillera occidental) (Renjifo & Lundberg, 1999), 6. Serranía Quinchas, 7. Córdoba.

| Taxones | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| <i>Bufo granulosus</i> (Spix, 1824) | | X | X | X | X | X | X |
| <i>Bufo haematiticus</i> (Cope, 1862) | X | X | X | | X | | |
| <i>Bufo marinus</i> (Linnaeus, 1758) | X | X | X | X | X | X | X |
| <i>Bufo sternosignatus</i> (Günther, 1859) | | X | X | | | | |
| <i>Centrolene prosoblepon</i> (Boettger, 1892) | X | X | | | | X | |
| <i>Cochranella punctulata</i> (Ruiz & Lynch, 1995) | | X | | | | | |
| <i>Cochranella susatamai</i> (Ruiz & Lynch, 1995) | | X | | | | | |
| <i>Hyalinobatrachium colymbiophyllum</i> (Taylor, 1949) | X | X | | | X | X | |
| <i>Hyalinobatrachium valerioi</i> (Dunn, 1931) | X | | | | | | |
| <i>Hyalinobatrachium fleischmanni</i> (Boettger, 1893) | X | X | X | | X | X | |
| <i>Colostethus inguinalis</i> (Cope, 1868) | X | X | X | | | X | |
| <i>Colostethus palmatus</i> (Werner, 1899) | | X | | | | X | |
| <i>Dendrobates truncatus</i> (Cope, 1861, "1860") | X | X | X | X | X | X | X |
| <i>Dendrosophus ebraccatus</i> (Cope, 1874) | X | X | | | X | X | X |
| <i>Dendrosophus microcephalus</i> (Cope, 1866) | X | X | X | X | X | X | X |
| <i>Dendrosophus phlebodes</i> (Stejneger, 1906) | | | | X | | | |
| <i>Gastrotheca nicefori</i> (Gauge, 1933) | X | X | | | | | |
| <i>Hemiphractus fasciatus</i> (Peters, 1862) | X | | | | | | |
| <i>Hyla vigilans</i> (Solano, 1971) | X | X | X | X | X | X | X |
| <i>Hyloscirtus palmeri</i> (Boulenger, 1908) | X | X | | | | | |
| <i>Hypsiboas albomarginatus</i> (Spix, 1824) | | | | X | | | |
| <i>Hypsiboas boans</i> (Linnaeus, 1758) | X | X | X | X | X | X | X |
| <i>Hypsiboas crepitans</i> (Wied-Neuwied, 1824) | X | X | X | X | | X | X |
| <i>Hypsiboas pugnax</i> (Schmidt, 1857) | X | X | X | X | X | X | X |
| <i>Hypsiboas subocularis</i> (Dunn, 1934) | X | X | | | | | |
| <i>Phyllomedusa venusta</i> (Duellman & Trueb, 1967) | X | X | X | X | X | X | |
| <i>Scinax boulengeri</i> (Cope, 1877) | X | | | X | X | X | X |
| <i>Scinax elaeochroa</i> (Cope, 1876) | X | | | | X | | |
| <i>Scinax rostratus</i> (Peters, 1863) | | X | X | | | | |
| <i>Scinax ruber</i> (Laurenti, 1768) | X | X | X | X | X | X | X |
| <i>Scinax x-signatus</i> (Spix, 1824) | | X | X | | | | X |
| <i>Smilisca phaeota</i> (Cope, 1862) | X | X | | | X | X | |
| <i>Smilisca sila</i> (Duellman & Trueb, 1966) | X | X | | X | X | X | |

Continuación Tabla 1.

| Taxones | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--|---|---|---|---|---|---|---|
| <i>Trachycephalus venulosus</i> (Laurenti, 1868) | X | X | | X | X | | X |
| <i>Ceratophrys calcarata</i> (Boulenger, 1890) | | | | X | X | | X |
| <i>Eleutherodactylus anthrax</i> (Lynch, 2001) | | X | X | | | | |
| <i>Eleutherodactylus bufoniformis</i> (Boulenger, 1896) | X | X | | | X | | |
| <i>Eleutherodactylus fitzingeri</i> (Schmidt, 1858) | | X | | | | | |
| <i>Eleutherodactylus gaigeae</i> (Dunn, 1931) | X | X | | | X | X | |
| <i>Eleutherodactylus gularis</i> (Boulenger, 1898) | X | | | | | | |
| <i>Eleutherodactylus johnstonei</i> (Barbour, 1914) | | | | X | | | |
| <i>Eleutherodactylus raniformis</i> (Boulenger, 1896) | X | X | X | X | X | X | X |
| <i>Eleutherodactylus taeniatus</i> (Boulenger, 1912) | X | X | X | | | X | |
| <i>Eleutherodactylus viejas</i> (Lynch & Rueda, 1999) | | X | | | | | |
| <i>Leptodactylus colombiensis</i> (Heyer, 1994) | | X | | | | | |
| <i>Leptodactylus fuscus</i> (Schneider, 1799) | | X | X | X | X | X | X |
| <i>Leptodactylus fragilis</i> (Brocchi, 1877) | X | X | X | X | X | X | X |
| <i>Leptodactylus insularum</i> (Barbour, 1906) | X | X | X | X | X | X | X |
| <i>Leptodactylus poecilochilus</i> (Cope, 1862) | X | X | | X | | | X |
| <i>Leptodactylus savagei</i> (Heyer, 2005) | | X | X | X | | | |
| <i>Pleuroderma brachyops</i> (Cope, 1869 "1868") | | | | X | X | | X |
| <i>Physalaemus pustulosus</i> (Cope, 1864) | X | X | X | X | X | X | X |
| <i>Pseudopaludicola pusilla</i> (Ruthven, 1916) | | X | X | X | X | X | X |
| <i>Chiasmocleis panamensis</i> (Dunn, Trapido & Evans, 1948) | X | X | | X | X | | X |
| <i>Nelsonophryne aterrima</i> (Günther, 1900) | X | X | | | | | |
| <i>Relictivomer pearsei</i> (Ruthven, 1914) | | X | X | X | X | | X |
| <i>Pseudis paradoxa</i> (Linnaeus, 1758) | | X | | X | X | | X |
| <i>Rana catesbeiana</i> (Shaw, 1802) | | X | | | | | |
| <i>Rana vaillanti</i> (Brocchi, 1877) | X | X | | | X | X | |
| <i>Caecilia caribea</i> (Dunn, 1942) | | X | | | | | |
| <i>Caecilia subnigricans</i> (Dunn, 1942) | | X | | | X | | X |
| <i>Caecilia thompsoni</i> (Boulenger, 1902) | | X | X | | | | |
| <i>Osaecilia polyzona</i> (Fisher, 1879) | X | X | X | | | | |
| <i>Parvicaecilia nicefori</i> (Barbour, 1925) | | X | | | | | |
| <i>Parvicaecilia pricei</i> (Dunn, 1944) | | X | X | | | | |
| <i>Typhlonectes natans</i> (Fischer, 1879) | | X | | | X | | X |
| <i>Bolitoglossa biseriata</i> (Tanner, 1962) | | | | | X | | |
| <i>Bolitoglossa lozanoi</i> (Acosta & Restrepo, 2001) | | X | X | | | X | |

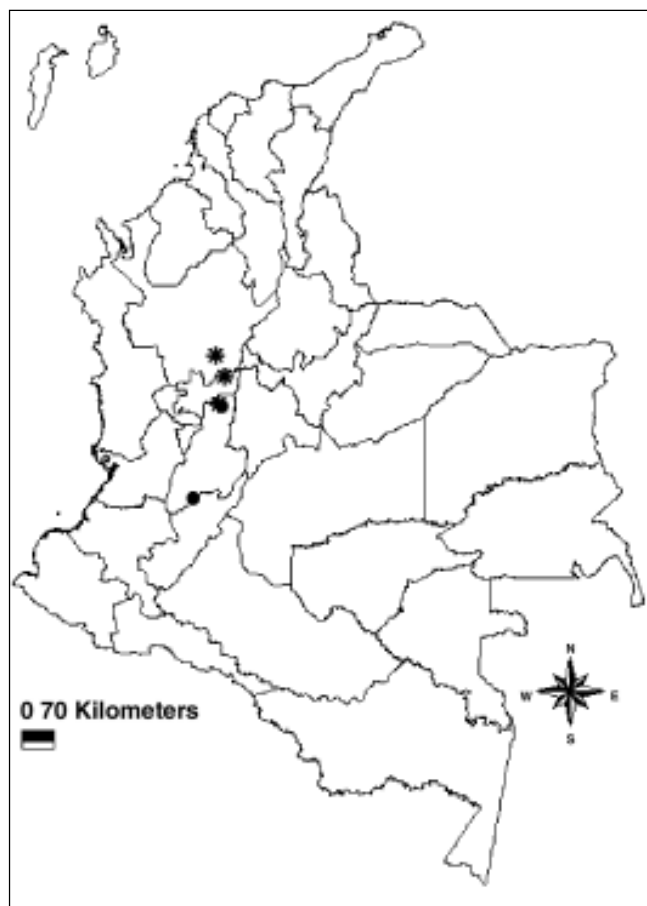


Figura 3. Patrones de distribución de especies restringidas al Valle del Magdalena • *Cochranella sustamai*, * *Cochranella punctulata*.

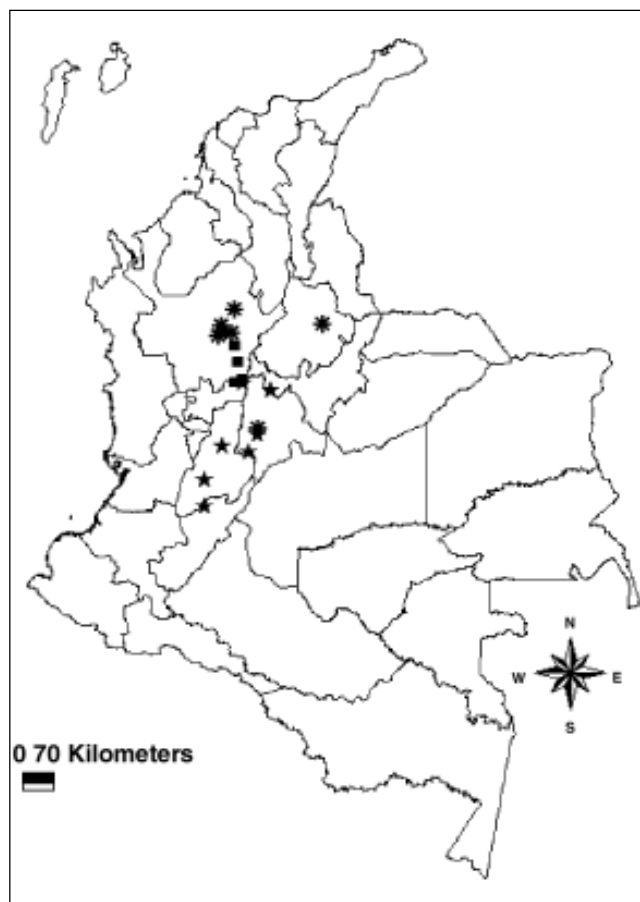


Figura 4. Patrones de distribución de especies restringidas al Valle del Magdalena ★ *Caecilia thompsoni* * *Eleutherodactylus taeniatus*, ■ *Eleutherodactylus anthrax*.

ten establecer que la fauna anfibia encontrada en la Reserva Riomanso se compone de elementos de diferentes regiones. La Figura 5 muestra que el Riomanso presenta una similitud de 69,85% con las otras seis regiones como un grupo, lo cual demuestra que la diversidad encontrada no se asemeja en mayor porcentaje a una zona particular. Estos aspectos dan indicios sólidos en cuanto a que el distrito “biogeográfico” de Nechí, es un mosaico de faunas que se articulan de acuerdo con el tipo de vegetación, humedad y altitud. Los valores de similitud de Bray-Curtis (Figura 6) entre la Reserva y las otras zonas tenidas en cuenta son: Atlántico y Bolívar (Región Caribe) – Riomanso 61%; Córdoba – Riomanso 59,64%; Quinchas – Riomanso 70%; Refugio Nechí – Riomanso 55,07%; Urrá-Riomanso 57,57%; Valle del Magdalena – Riomanso 68,96%. Estos valores demuestran que la fauna de la Reserva tiene una alta similitud con todas las zonas comparadas, valores superiores a 55%. La mayor similitud se da entre la Reserva y la fauna registrada para La Serranía de

las Quinchas (70%) y la menor entre Riomanso y el Refugio Nechí (*sensu Lynch & Suárez, 2004a*) (55,07%).

Teniendo en cuenta que en la metodología implementada para esta aproximación a los anfibios de la Reserva Riomanso, los muestreos han sido restringidos a métodos de inspección tradicional como captura visual-auditiva y remociones, no se incluyen evaluaciones completas en ambientes acuáticos (larvas y especies acuáticas), pastizales y cobertura de selva húmeda, lo que hace probable que en futuros muestreos sean registradas especies adicionales señaladas para el valle del Magdalena como: *Centrolene prosoblepon*, *Chiasmocleis panamensis*, *Colostethus palmatus*, *Eleutherodactylus gaigeae*, *Gastrotheca nicefori*, *Hyalinobatrachium colymbiphyllum*, *Dendrosophus ebraccatus*, *Dendrosophus subocularis*, *Hyloscirtus palmeri*, *Trachycephalus venulosus*, *Pseudis paradoxa*, *Smilisca phaeota*, *Smilisca sila*, *Rana vaillanti*, *Parvicacilia nicefori*, y *Typhlonectes natans*



Figura 5. Patrones de distribución de especies restringidas al Valle del Magdalena • *Eleutherodactylus viejas* + *Colostethus palmatus*, ▲ *Bolitoglossa lozanoi*.

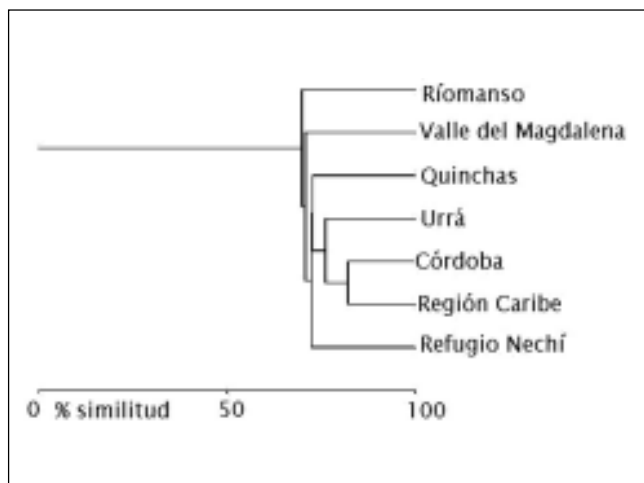


Figura 6. Índice de similitud de Bray-Curtis entre faunas asociadas a las tierras bajas de la región cisandina.

Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias al apoyo incondicional de la familia Jaramillo, particularmente de Ana María Jaramillo por su apoyo logístico en el desarrollo de los estudios de la fauna de vertebrados en el área de la Reserva Privada Riomanso. Hacemos extensivo a los funcionarios de la Corporación Autónoma Regional de Caldas CORPOCALDAS: Mónica Donuyer de Ordenamiento Territorial y Oscar Ospina, Director de Fauna. También a los estudiantes de la Asignatura de Biología de Anfibios del segundo semestre del 2003 de la Pontificia Universidad Javeriana, quienes participaron activamente en el desarrollo de este aporte. Los autores expresan su gratitud a John D. Lynch por sus oportunos comentarios; finalmente a Never y Myrian Molina por su ayuda permanente y acompañamiento en la labor de campo.

Bibliografía

- Acosta-Galvis, A.R.** 2000. Ranas, Salamandras y Caecilias (Tetrapoda: Amphibia) de Colombia. *Biota Colombiana* 1(3): 289-319.
- . 2004. Salamandra corpulenta café. *Bolitoglossa lozanoi*. Pp. 298-301. En: Rueda Almonacid, J.V., J.D. Lynch & A. Amézquita (Eds.). Libro Rojo de los Anfibios de Colombia. Serie de libros rojos de especies amenazadas de Colombia. Conservación Internacional Colombia, Instituto de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Colombia. Ministerio del Medio Ambiente. Bogotá, Colombia.
- & **A.E. Restrepo.** 2001. Una nueva especie de *Bolitoglossa* (Caudata: Plethodontidae) de las selvas del Magdalena medio en Colombia. *Caldasia* 23(2): 467-474.
- Cochran, D.M. & C. J. Goin.** 1970. *Frogs of Colombia*. Smithsonian Institution Press, USA.
- Cuentas D., R. Borja, J. D. Lynch & J.M. Renjifo.** 2002. Anuros del departamento del Atlántico y norte de Bolívar. Universidad del Atlántico. CRA. Pp. 117.
- De Carvalho, A.L.** 1954. A preliminary synopsis of the genera of American microhylid frogs. *Occasional Papers of the Museum of Zoology University of Michigan* (555): 1-19.
- Duellman, W.E. & L. Trueb.** 1967. Two new species of tree frogs (Genus *Phyllomedusa*) from Panamá. *Copeia* (1): 125-131.
- Duellman, W.E.** 2000. *Hylid frog middle America*. Reprint of Monograph of the Museum of natural History. The University of Kansas Number. Pp. 753.
- Faivovich, J., C.F. Haddad, P.C. Garcia, D.R. Frost, J.A. Campbell & W.C. Wheeler.** 2005. Systematic review of the frog family Hylidae, with special references to Hylinae: phylogenetic analysis and taxonomic revision. *Bulletin of the American Museum of Natural History*. No. 294. Pp. 240.

- Grant, T.** 2004. On the identities of *Colostethus inguinalis* (Cope, 1868) and *C. panamensis* (Dunn, 1933) with comments on *C. latinasus* (Cope, 1863) (Anura: Dendrobatidae). American Museum Novitates 3444: 1-24.
- Hernández, J., A.H. Guerra, R.O. Quijano & T. Walschburger.** 1992. Unidades biogeográficas de Colombia. En: Halffter, G. (Ed.). La diversidad biológica de Iberoamérica I. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Instituto de Ecología. Primera Edición.
- Heyer, R.W.** 1978. Systematics of the *fuscus* group of frogs genus *Leptodactylus* (Amphibia: Leptodactylidae). Natural History Museum of Los Angeles County Science Bulletin. 29: 1-84.
- _____. 1979. Systematics of the *pentadactylus* species group of the genus *Leptodactylus* (Amphibia: Leptodactylidae). Smithsonian Institution Press 301: 1-42.
- _____. 2005. Variation and Taxonomic clarification of the large species of the *Leptodactylus pentadactylus* species group (Amphibia: Leptodactylidae) from Middle America, Northern South America, And Amazonia 37(3) Museu De Zoologia Da Universidade De São Paulo.
- Kluge, A.G.** 1979. The gladiator frogs of Middle America and Colombia a reevaluation of their systematics (Anura: Hylidae). Occasional Papers of the Museum of Zoology University of Michigan (688):1-23.
- Lynch, J.D.** 1989. A review of the leptodactylid frogs of the genus *Pseudopaludicola* in northern South America. Copeia (3): 577-588.
- _____. "1999" 2000. Una aproximación a las culebras ciegas de Colombia (Amphibia: Gymnophiona). Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. 23(Suplemento Especial): 317-337.
- _____. 2001. Three new rainfrogs of the *Eleutherodactylus diastema* group from Colombia and Panama. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales 25(95): 287-297.
- _____. & **A.R. Acosta-Galvis.** 2004. Discovery of *Osaecilia polyzona* (Amphibia: Gymnophiona: Caeciliidae) in the Middle Magdalena with notes on its abundance and habitat. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales 28(109): 585-589.
- _____. & **M.C. Ardila.** 1999. The *Eleutherodactylus* of the *taeniatus* complex in western Colombia: taxonomy and distribution. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales 23(89): 615-624.
- _____. & **C.W. Myers.** 1983. Frogs of the *fitzingeri* group of *Eleutherodactylus* in eastern Panamá and Chocóan South America (Leptodactylidae). Bulletin of the American Museum Natural History 175(5): 484-565.
- _____. & **J.V. Rueda-Almonacid.** 1999. New species of frogs from low and moderate elevations from the Caldas transect of the eastern flank of the Cordillera Central. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas 23(87): 307-314.
- _____. & **A. M. Suárez.** 2001. The distributions of the gladiator frogs (*Hyla boans* group) in Colombia, with comments on size variation and sympatry. Caldasia 23(2): 491-507.
- _____. & **A.M. Suárez.** 2004a. Anfibios en el Chocó Biogeográfico. Pp. 633-653. En: Rangel, O. (Ed.). Colombia Diversidad Biótica IV. El Chocó biogeográfico/ Costa Pacífica. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias Instituto de Ciencias Naturales, Bogotá.
- _____. & **A.M. Suárez.** 2004b. Catálogo de Anfibios en el Chocó Biogeográfico. Pp. 654-667. En: Rangel, O. (Ed.). Colombia Diversidad Biótica IV. El Chocó biogeográfico/ Costa Pacífica. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias Instituto de Ciencias Naturales, Bogotá.
- Nieto, M.J.** "1999" 2000. Estudio preliminar de las especies del género *Scinax* (Amphibia: Anura: Hylidae) en Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. 23(Suplemento Especial): 339-346.
- Renjifo J.M. & M. Lundberg.** 1999. Guía de campo Anfibios y Reptiles de Urrá. SKANSKA. Pp. 96
- Ruiz-Carranza, P.M. & J.D. Lynch.** 1991. Ranas Centrolenidae de Colombia I Cuatro Propuesta de una nueva clasificación Genérica. Lozania (Acta Zoológica Colombiana) (57)1-30.
- _____. & **J.D. Lynch.** 1995. Ranas Centrolenidae de Colombia V. Cuatro nuevas especies de *Cochranella* de la Cordillera Central. Lozania (Acta Zoológica Colombiana) (62): 1-23.
- _____. , **M.C. Ardila & J.D. Lynch.** 1996. Lista actualizada de la fauna Amphibia de Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. 20(77): 365-415.
- _____. & **J.D. Lynch.** 1997. Ranas Centrolenidae de Colombia X. Los controlénidos de un perfil del flanco oriental de la cordillera Central en el departamento de Caldas. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales 21(81): 541-553.
- Solano, A.** 1971. Una nueva especie del género *Hyla* (Amphibia: Anura) de Venezuela. Acta Biológica Venezolana 7(2): 211-218.
- Silverstone, P.A.** 1975. A revision of the poison arrow frogs of the genus *Dendrobates* Wagler. Natural History Museum Los Angeles County Science (21): 1-53.
- Stebbins, R.C. & J.R. Hendrickson.** 1959. Field studies of amphibians in Colombia, South America. University of California Pub Zool 56: 497-540.
- Vélez, C.M.** "1999" 2000. Presencia de *Bufo sternosignatus* Günther 1859 (Amphibia: Anura: Bufonidae) en Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. 23 (Suplemento Especial): 411-416.

Recibido el 3 de abril de 2006.

Aceptado para su publicación el 10 de mayo de 2006.

