

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

LA ACADEMIA ES ÓRGANO CONSULTIVO DEL GOBIERNO NACIONAL

VOLUMEN XXXIII

JUNIO DE 2009

NÚMERO 127

DIRECTOR DE LA REVISTA: PEDRO PRIETO



CONTENIDO - CONTENTS

	Pág.		Pág.
Botánica (Botany)		Estudio teórico de la interacción entre la glutatión zeta transferasa (GSTZ) y ácidos α -Haloalcanoicos [Theoretical study of the interaction between zeta Glutathione Transferase (GSTZ) and Acid α -Haloalkanes] <i>Ricardo Vivas-Reyes, Angélica Padilla & Emiliano Martínez ..</i>	253
Sinopsis de la subfamilia Spiranthoideae (Orchidaceae) en Colombia, Parte II [Synoptical review of the Spiranthoideae orchids from Colombia Part II] <i>Hilda del Carmen Dueñas Gómez & José Luis Fernández-Alonso</i>	157	Zoología (Zoology)	
Potencial antioxidante de hojas y corteza de <i>Bauhinia kalbreyeri</i> harms: contribución de sus flavonoides en esta actividad [Antioxidant potential from leaves and bark of <i>Bauhinia kalbreyeri</i> harms: contribution of their flavonoids in this activity] <i>Heidy F. Ortiz, Wilmer F. Sánchez, John Méndez A. & Elizabeth Murillo P.</i>	183	Evaluación rápida de peces arrecifales y su relación con la estructura del sustrato en las Islas del Rosario, área marina protegida del Caribe Colombiano [Rapid evaluation of reef fishes and their relationship with the substrate structure in the Rosario Islands, marine protected area from Colombian Caribbean] <i>Oscar Delgadillo-Garzón & Paula Zapata-Ramírez</i>	273
Abundancia, disposición espacial e historia natural de <i>Hypsiboas Lanciformis</i> (Anura:Hylidae) al suroeste de los Andes Venezolanos [Abundance, spatial arrangement and natural history of <i>Hypsiboas Lanciformis</i> (Anura: Hylidae) from southwestern Andean Venezuela] <i>William Tovar-Rodríguez, Andrés Chacón-Ortiz & Rosa de Jesús Durán</i>	193	Escarabajos del género <i>dichotomius hope</i> 1838 (Scarabaeidae: Scarabaeinae) en la Amazonía Colombiana [Beetles of the genus, <i>dichotomius hope</i> 1838 (Scarabaeidae: Scarabaeinae) in the Colombian Amazonia] <i>Rodrigo Sarmiento-Garcés & Germán Amat-García</i>	285
Física (Physics)		Notas (Notes)	
Fundamentals of information and computation in the realm of the quanta [Fundamentos de la información y la computación dentro del ámbito cuántico] <i>John H. Reina</i>	201	Primer registro de sitio dormidero para una colonia del lorito Cadillero, <i>Bolborhynchus Ferrugineifrons</i> , y algunas observaciones ecológicas y comportamentales [First record of a roosting site for a colony of rufous-fronted parakeets, <i>Bolborhynchus Ferrugineifrons</i> , and, some ecologic and behavior records] <i>David A. Bejarano-Bonilla & Annie M. Jiménez Bonilla</i>	297
Química (Chemistry)		Constitución de la Academia (Members of the Academy)	303
Efecto de los tratamientos químicos y térmicos sobre la microestructura y composición química de la tierra diatomácea [Effect of thermal and chemical treatments on the micro-structure and chemical composition of diatomacea land] <i>Ángela X. Moreno E., Alexander Iles Q. & J. E. Rodríguez - Páez</i>	243	Publicaciones de la Academia (Publications of the Academy)	305

SINOPSIS DE LA SUBFAMILIA SPIRANTHOIDEAE (ORCHIDACEAE) EN COLOMBIA, PARTE II

Por

Hilda del Carmen Dueñas Gómez¹ & José Luis Fernández-Alonso²

Resumen

Dueñas Gómez, H. del C. & J. L. Fernández Alonso: Sinopsis de la subfamilia Spiranthoideae (Orchidaceae) en Colombia, Parte II. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **33**(127): 157-181, 2009. ISSN 0370-3908.

Como segunda y última entrega de la revisión sinóptica de la subfamilia Spiranthoideae para Colombia, se presenta a continuación la parte correspondiente a la tribu Spirantheae subtribus Cyclopogoninae (3 géneros, 41 especies) y Stenorrhynchidinae (9 géneros, 15 especies) y la Tribu Cranichideae (5 géneros, 53 especies). Los géneros más diversos en estas tribus son: *Cranichis* (20 especies), *Cyclopogon* (17), *Ponthieva* (15) y *Pelexia* (14). Como parte de los resultados de este estudio: a)- se propone con base en la morfología floral (la estructura del rostelo y viscidio), la transferencia del género *Cybebus* de la subtribu Spiranthinae donde venía siendo ubicado a la subtribu Stenorrhynchidinae; b)- se registran para Colombia por primera vez los géneros *Lyroglossa* (*L. grisebachii*) y *Helonoma*, proponiéndose la combinación nueva *Helonoma peruviana* (Szlach.) Salazar, Dueñas & Fern.Alonso; c) Se añaden nuevos registros a la lista conocida de especies colombianas, pertenecientes a los géneros: *Coccineorchis* (*C. cristata*, *C. navarrensis*), *Cyclopogon* (*C. maldonadoanus*, *C. olivaceus*, *C. rimbachii*), *Pelexia* (*P. hirta*, *P. palmorchidis*), *Ponthieva* (*P. venusta*), y *Sarcoglottis* (*S. grandiflora*, *S. maasorum*, *S. neglecta*, *S. stergiosii*); d) se incluyen también 19 registros de especies recientemente publicadas, correspondientes a los géneros tratados en la parte I (*Aspidogyne* y *Microchilus*); e) se incluye por último un análisis de la distribución y diversidad de los géneros de esta subfamilia según rangos altitudinales en Colombia; el grupo presenta una distribución básicamente andina, encontrándose principalmente entre 1300 y 3600 m de altitud. Los géneros ampliamente distribuidos son *Microchilus*, *Gomphichis*, *Cyclopogon*, *Pelexia*, *Sarcoglottis*, *Coccineorchis*, *Stenorrhynchos*, *Cranichis* y *Ponthieva*, encontrados casi desde el nivel del mar hasta más de 3000 m, en todas las regiones del país. En contraste, *Beloglottis*, *Brachystele*, *Cybebus*, *Eltroplectris*, *Hapalorchis*, *Helonoma*, *Lankesterella*, *Lyroglossa*, *Kreodanthus*, *Pteroglossa* y *Sauroglossum*, tienen distribución muy restringida.

Palabras clave: Colombia, Cranichideae, Cyclopogoninae, *Helonoma*, *Lyroglossa*, Orchidaceae, Spirantheae, Stenorrhynchidinae, Taxonomía.

¹ Universidad Surcolombiana, Av. Pastrana Borrero, Cra. 1ª, Neiva, Huila, Colombia. Correo electrónico: hildugo@usco.edu.co / hildugo@gmail.com

² Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Apartado Aéreo 7495, Bogotá D. C., Colombia. Correo electrónico: jlfernandeza@unal.edu.co

Abstract

As second and last contribution to the synoptic treatment of the Spiranthoideae for Colombia, the synopsis of the tribes Spiranthae (subtribes Cyclopogoninae: 3 genera, 41 species and Stenorrhynchidinae: 9 genera, 15 species) and Cranichideae (5 genera, 53 species), is presented. The most diverse genera in these tribes are: *Cranichis* (20 species), *Cyclopogon* (17), *Ponthieva* (15) and *Pelexia* (14). As part of the results of this study: a)- The transfer of *Cybebus* from the subtribe Spiranthinae (where it was commonly placed) to the subtribe Stenorrhynchidinae, is proposed, based on the floral morphology (the rostellum and viscidium structure). b)- two genera are reported for Colombia as new records, each one with one species: *Lyroglossa* (*L. grisebachii*) and *Helonoma*; for the latter the new combination *Helonoma peruviana* (Szlach.) Salazar, Dueñas & Fern. Alonso is proposed. c) New records in the previously known list of Colombian orchids are presented: *Coccineorchis* (*C. cristata*, *C. navarrensis*), *Cyclopogon* (*C. maldonadoanus*, *C. olivaceus*, *C. rimbachii*), *Pelexia* (*P. hirta*, *P. palmorchidis*), *Ponthieva* (*P. venusta*), and *Sarcoglottis* (*S. grandiflora*, *S. maasorum*, *S. neglecta*, *S. stergiosii*). d)- And additional 19 new records of species belonging to *Aspidogyne* and *Microchilus*, not reported in Dueñas & Fernández-Alonso (2007), are also included. e)- Finally an analysis of the distribution and diversity of the genera of this subfamily, according to altitude ranges in Colombia is presented. This group has predominant Andean distribution, being found mainly between 1300 and 3600 m of altitude. Genera broadly distributed as *Microchilus*, *Gomphichis*, *Cyclopogon*, *Pelexia*, *Sarcoglottis*, *Coccineorchis*, *Stenorrhynchos*, *Cranichis* and *Ponthieva*, are found almost from the level up to 3000 m, in all the regions of the country. In contrast, *Beloglottis*, *Brachystele*, *Cybebus*, *Eltroplectris*, *Hapalorchis*, *Helonoma*, *Lankesterella*, *Lyroglossa*, *Kreodanthus*, *Pteroglossa* and *Sauroglossum*, have very restricted distribution.

Key words: Colombia, Cranichideae, Cyclopogoninae, *Helonoma*, *Lyroglossa*, Orchidaceae, Spiranthae, Stenorrhynchidinae, Taxonomy.

Introducción

Luego de concluido el estudio sinóptico de las orquídeas terrestres de la subfamilia Spiranthoideae para Colombia, se puede señalar que esta subfamilia en nuestro país está conformada por 231 especies, organizadas en 34 géneros, 6 subtribus y 3 tribus (Clasificación según Szlachetko, 1995, 2000), de las cuales, Spiranthae es la más diversa con 4 subtribus, 23 géneros y 104 especies. El presente documento corresponde a la segunda parte de este estudio, que continúa al ya publicado de Dueñas y Fernández-Alonso (2007). En esta ocasión se abordan los géneros de las tribus Spiranthae (subtribus Cyclopogoninae y Stenorrhynchidinae) y Cranichideae.

En tiempos recientes, se ha puesto en duda la clasificación supragenérica (subfamilias, tribus y subtribus) de Szlachetko (2000), en el sentido de considerar a Spiranthoideae como una subfamilia independiente de Orchidoideae. La tendencia actual es a tratar al primer grupo como tribu Cranichideae, dentro de la gran subfamilia Orchidoideae (Pridgeon *et al.*, 2003; Salazar *et al.*, 2003). Nuevos análisis moleculares de diferentes autores refuerzan esta tendencia en lo referente a la tribu Cranichideae y muestran

también cambios en la conformación de las subtribus (Górniak *et al.*, 2006; Figueroa *et al.*, 2008; Alvarez-Molina & Cameron, 2009; Salazar *et al.*, en prensa).

Metodología

El estudio se llevó a cabo mediante la revisión e identificación de los ejemplares de los herbarios nacionales: AFP, CAUP, CHOCÓ, COAH, COL, CUVC, FAUC, FMB, HUA, JAUM, HUQ, MEDEL, PSO, SURCO, UPTC, así como de colecciones de los autores en diferentes regiones del país, principalmente en la Cordillera Oriental de Colombia. De algunas se preservaron flores en alcohol, para facilitar su posterior disección y de algunas especies (*Cranichis*, *Cyclopogon*, *Gomphichis*, *Sarcoglottis*, *Stenorrhynchos*) se mantuvieron plantas en cultivo. También se tuvo acceso en muchos casos a la información referente a especímenes tipo depositados en herbarios del exterior como AMES, F, MO, NY y US. Para las abreviaturas de herbarios se siguió a Holmgren & Holmgren (1998). La distribución de géneros y especies se obtuvo en gran medida de los más de 1.000 ejemplares revisados en los diferentes herbarios, y de la información complementaria procedente de la revisión de literatura especializada.

La información se presenta en forma sinóptica, según tribus y subtribus, en las que los géneros y especies se ordenan alfabéticamente. Para cada especie, se indica: nombre científico, distribución según regiones naturales, departamentos, rangos altitudinales y ejemplar representativo señalando el herbario o en su defecto la cita bibliográfica sólida, indicando el autor. En lo que se refiere a distribución geográfica, se hace referencia en primera instancia a las clásicas regiones naturales de Colombia (Amazonía, AMAZ; Orinoquía, ORIQ, Caribe, CARI y Pacífico – Chocó Biogeográfico, CHOC) sin considerar como tal la región Andina, la cual se subdivide en las siguientes: Cordillera Central (CCEN), Cordillera Occidental (COCC), Cordillera Oriental (CORI), Nudo de los Pastos (NUPA), Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) y Valles Interandinos VAIN, dada la importancia de la distribución diferencial de este grupo en el gradiente altitudinal. En segundo término, se indican los departamentos, citando solo las tres primeras letras de su nombre, con excepción de Guaviare (Gre), La Guajira (Gra) y Norte de Santander (Nsa).

Resultados

SUBFAMILIA SPIRANTHOIDEAE DRESSL (continuación)

D. Tribu *Spirantheae* Endl., Subtribu *Cyclopogoninae* Szlach (Grupo “*Cyclopogon*”)

Plantas con rostelo alargado, membranoso; polínios 4, desiguales, con caudículas; viscidio producido sobre la superficie dorsal del rostelo. 3 géneros 41 especies en Colombia.

17. *Cyclopogon* C. Presl (Figura 1-a,b,c).

Plantas pequeñas o medianas; escapo erguido con brácteas lanceoladas; hojas pequeñas, elípticas a ovadas, generalmente con la base decurrente sobre el pecíolo. Flores casi siempre blancuzcas, pequeñas, ascendentes y arqueadas hacia fuera, subsecundas, con corto pedicelo; columna larga, con un cojín alargado de pelos abajo de la zona estigmática; antera ovada; clinandrio membranoso, infundibuliforme; rostelo membranoso, linear-lanceolado, ápice obtuso-partido, viscidio ovoide; polínios con caudículas cortas. **Distribución:** El género *Cyclopogon* se encuentra constituido por unas 60 especies (Mytnik *et al.*, 2004), distribuidas en América tropical y subtropical. Hoehne (1945) considera que el centro de dispersión del género es Brasil meridional, de donde se conocen más del 50% de las especies. En Colombia se encuentran cerca de 20 especies (algunas muy poco conocidas), 16 de ellas incluidas en este catálogo. Se encuentran en las tres cordilleras y en la Sierra Nevada de Santa Marta, entre 1000 y

3300 m de altitud, muy pocas veces por debajo de 1000 m. Son plantas terrestres, observadas frecuentemente en lugares intervenidos como pastizales, matorrales y taludes a orilla de carreteras, aunque también se encuentran dentro de bosque y en el páramo.

17.1. *Cyclopogon argyrotaenius* Schltr., Repert. Spec. Nov. Regni Veg. Beih. 8: 44, 1921. Tipo: Ecuador: CHIMBORAZO, Sep 1881, *Sodirol 144* (HT: B destr.; LT: QPLS) Presente en Ecuador en Carchí, cerca de territorio colombiano. Indicada para Colombia por **Dodson** (1992).

17.2. *C. bicolor* (Ker Gawl.) Schltr., Repert. Spec. Nov. Regni Veg. Beih. 6: 52, 1919. Tipo: Planta cultivada, procedente de la Isla de Trinidad, 1823, *G. Don s.n.* (MOBOT, 2008). Citada para Colombia por **Dodson** (1992).

17.3. *C. cranichoides* (Griseb.) Schltr., Beih. Bot. Centralbl. 37(2): 387, 1920. Basiónimo *Pelexia cranichoides* Griseb., Tipo: Cuba Occ., sin localidad precisa, sin fecha, *C. Whright 3293* (AMES). Citada para Colombia por **Dodson** (1992).

17.4. *C. elatus* (Sw.) Schltr., Repert. Spec. Nov. Regni Veg. Beih. 6: 53, 1919. **Distribución:** regiones, CCEN, COCC, CORI, NUPA; departamentos, Ant, Cun, Mag, Nar, Sant, Val, 1000-1900 m. Colección testigo: **CUNDINAMARCA:** Mosquera, La Herrera, 2600 m, 19 abr 1989, (fl., fr.), *J.L. Fernández-Alonso 7969* (COL). **SANTANDER:** San J. de Suaita, 1100-1300 m, 24 oct 2001 (fl), *L. C. Jiménez et al. 525* (COL).

17.5. *C. epiphyticus* (Dodson) Dodson., Icon. Pl. Tropicarum, ser. 2 (5): pl. 430, 1989. Tipo: Ecuador. LOS RÍOS, Río Palenque, 220 m, sep 1972, *C. Dodson 5139* (SEL holotypus, QCA isotypus). Especie presente en zonas limítrofes de Esmeraldas y Carchí, Ecuador y citada para Colombia en el listado de **Dodson** (1992, 1993).

17.6. *C. hennisianus* (Sandt) Dodson., Orquideología 19(1): 94, 1993. Basiónimo: *Stenorhynchos hennisianus* Sandt. Tipo: **TOLIMA:** without locality, introduced by Hennis, *Hennis s.n.* (HT: M). **Distribución:** regiones, VAIN; departamentos, Tol. (**Dodson**, 1992).

17.7. *C. lindleyanus* (Link, Klotzsch & Otto) Schltr., Beih. Bot. Centralbl. 37(2): 389, 1920. **Distribución:** regiones, COCC; departamentos, Cun, 1860 m. Colección testigo: **CUNDINAMARCA:** Cabrera, 1860 m, 21 feb 1969 (fl), *P. Ortiz 176* (HPUJ).

17.8. *C. lueorum* Dodson, Orquideología 19(2): 127. 1994. Tipo: Ecuador: CARCHI: Tulcán, 2900 m 14 ene 1992, *C. Luer & al. 15596* (HT: RPSC). Presencia probable en zonas limítrofes de Nariño, en Colombia.

17.9. *C. maldonadoanus* Dodson, Orquideología 19(1): 95-96, 1993. Tipo: Ecuador: CARCHI: 2500 m 10 Sep 1991; *Hirtz 5643* (HT: RPSC) (**Dodson**, 1993). se presume su presencia en Colombia, posiblemente en el departamento de Nariño.

17.10. *C. millei* (Schltr.) Schltr., Beih. Bot. Centralbl. 37(2): 391, 1920. Basiónimo: *Spiranthes millei* Schltr. Tipo: Ecuador: PICHINCHA: 2800 m, L. Mille 24; (HT: B destr.; LT: QPLS!). Mencionada para Colombia por **Ortiz** (1995).

17.11. *C. olivaceus* (Rolfe) Schltr., Beih. Bot. Centralbl. 37(2): 392, 1920. **Distribución:** regiones, CCEN, COCC, CORI; departamentos, Ant, Ch, Cun, 2150-2900 m. Colección testigo: **ANTIOQUIA:** SE de Caldas, 2450-2560 m, 6°15' N, 75°32' W, 23 oct 1983 (fl), *A. Juncosa & G. Misas 1102* (JAUM). **CHOCÓ.** San José del Palmar. *E. Forero 7464* (COL). = *Beadlea olivacea* (Rolfe) Garay.

17.12. *C. ovalifolium* Presl., Rel. Haenk. 1(2): 93, t. 13, f. 1, 1827. **Distribución:** regiones, COCC, CORI; departamentos, Ant, Caq, Cau, Nar, 1450-2100 m. Colección testigo: **ANTIOQUIA:** Urrao, PNN Las Orquídeas, 1450 m, 6°32' N, 76°19' W, 9 dic 1993 (fl), *A. Cogollo et al. 8013* (JAUM).

17.13. *C. peruvianus* (Presl.) Schltr. (Figura 1-a,b),

Beih. Bot. Centralbl. 37(2): 393, 1920. **Distribución:** regiones, CORI, NUPA, SNSM, VAIN; departamentos, Ant, Boy, Cau, Cun, Nar, Gra, Mag, Val, 1050-3300 m. Colección testigo: **CUNDINAMARCA:** Nemocón, Hacienda Susatá, 2850 m, 23 ago 2000, (fl.) *J.L. Fernández-Alonso & al. 19044* (COL); Mosquera, Laguna de La Herrera, 2750 m, 6 ago 1963 (fl, fr), *D. D. Soejarto 342* (COL).

17.14. *C. af. plantagineus* (Lindl.) Schltr., Beih. Bot. Centralbl. 37: 393, 1920. **Distribución:** regiones, CCEN; departamentos, Hui, 1700 m. Colección testigo: **HUILA:** San José de Isnos, "La Chorrera", floreció en Santandercito (Cundinamarca), oct 1972, *P. Ortiz 592* (HPUJ).

17.15. *C. prasophyllum* (Rchb. f.) Schltr. 1920. Beih. Bot. Centralbl., Abt. 2. 37(2): 393. **Distribución:** regiones, Choc; departamentos, Cho, Colección testigo: **CHOCÓ:** Serranía del Baudó, may 1991. *G. Misas U., 257a/b* (HPUJ). **CHOCÓ:** Nuquí, Quebrada Chaquí, 200 m, 1 mar 1994 (fl), *G. Galeano et al. 4725* (COL).

17.16. *C. rimbachii* Schltr., Repert. Spec. Nov. Regni Veg. Beih. 8: 166, 1921. **Distribución:** regiones, CORI; departamentos, Cun, 2850-2900 m. Colección testigo: **CUNDINAMARCA:** Páramo de Usquén, 2900 m, 21 nov 1943 (fl), *M. Schneider 23* (COL); Serranía de Sisga, 2850 m, 3 oct 2003 (fl, fr), *M. Ospina 1583* (COL).

17.17. *Cyclopogon* sp. (Figura 1-c). **Distribución:** regiones, CHOC, CORI; departamentos Hui, Nsa, 200-2350 m. Colección testigo: **NORTE DE SANTANDER:** Vía Pamplona-Toledo, dirección a San Bernardo, 2350 m, 31 oct 1994 (fl), *J.L. Fernández-Alonso et al 11737* (COL).

18. *Pelexia* Poit.

Plantas relativamente robustas; hojas con pecíolo bien diferenciado, lámina ovada a elíptica. Inflorescencia terminal, flores más o menos espaciadas, blanco-cremosas, relativamente grandes, espolón sepalino con el ápice libre; columna relativamente larga, erguida, pubescente, con largo pie decurrente y adnado al ovario excepto en el ápice; antera ovada; rostelo membranoso, lanceolado, con el viscidio alargado; rostelo remanente obtuso; polinios gruesos con cortas caudículas. **Distribución:** Actualmente del género *Pelexia* se conocen alrededor de 45 especies nativas del trópico americano, distribuidas desde Florida, México y Las Antillas hasta Argentina (**Mytnik et al.**, 2004); del Brasil se conocen más de la mitad de las especies. Para Colombia se registran catorce especies, distribuidas en las tres cordilleras, entre 100 y 2900 m de altitud, observándose principalmente en sitios boscosos húmedos, aunque *Pelexia hirta* (Poepp. & Endl.) Lindl., se ha encontrado en zonas xerofíticas.

18.1. *Pelexia callifera* (C. Schweinf.) Kuntze., Bot. Mus. Leafl. 28(4): 343, 1980 (1982). Basiónimo: *Spiranthes callifera* C. Schweinf. Tipo: Venezuela: BOLIVAR. Macizo de Chimantá, río Apururén, 470 m, 16 ene 1955, *Steyermark & Wurdack 96* (HT: NY). Referencias: Citada para Colombia por **Garay** (1978a).

18.2. *P. caucae* Schltr., Repert. Spec. Nov. Regni Veg. Beih. 7: 67, 1920. Tipo: **CAUCA:** ca. 500 m alt., *M. Madero s/n* (**Schlechter**, 1920b). **Distribución:** regiones, VAIN; departamentos, Cau, 500 m.

18.3. *P. decora* (Garay) Garay, Bot. Mus. Leafl. 28(4): 343, 1982. Basiónimo: *Spiranthes decora* Garay: COLOMBIA. **SANTANDER**, 1500 m, 11-15 dic 1926, *E.P. Killip & A.C. Smith 15318* (AMES). Citada para Colombia por **Dodson** (1992).

18.4. *P. af. funkiana* (A. Rich. & Galeotti) Schltr., Repert. Spec. Nov. Regni Veg. 15: 197, 1918 (Anotación: como "funkiana"). **Distribución:** regiones, COCC, NUPA; departamentos, Ant, Cau, Cho, entre 1200 y 1950 m. Colección testigo: **CAUCA:** El Tambo, vereda La Romelia, PNN Munchique, 1950 m, 28 jul 1993 (fl), *G. Lozano et al. 6715* (COL, MA, FBM).

18.5. *P. hamata* Schltr., Repert. Spec. Nov. Regni Veg. Beih. 7: 68, 1920. Tipo: **CAUCA**, ca. 1000 m. alt. *M. Madero*

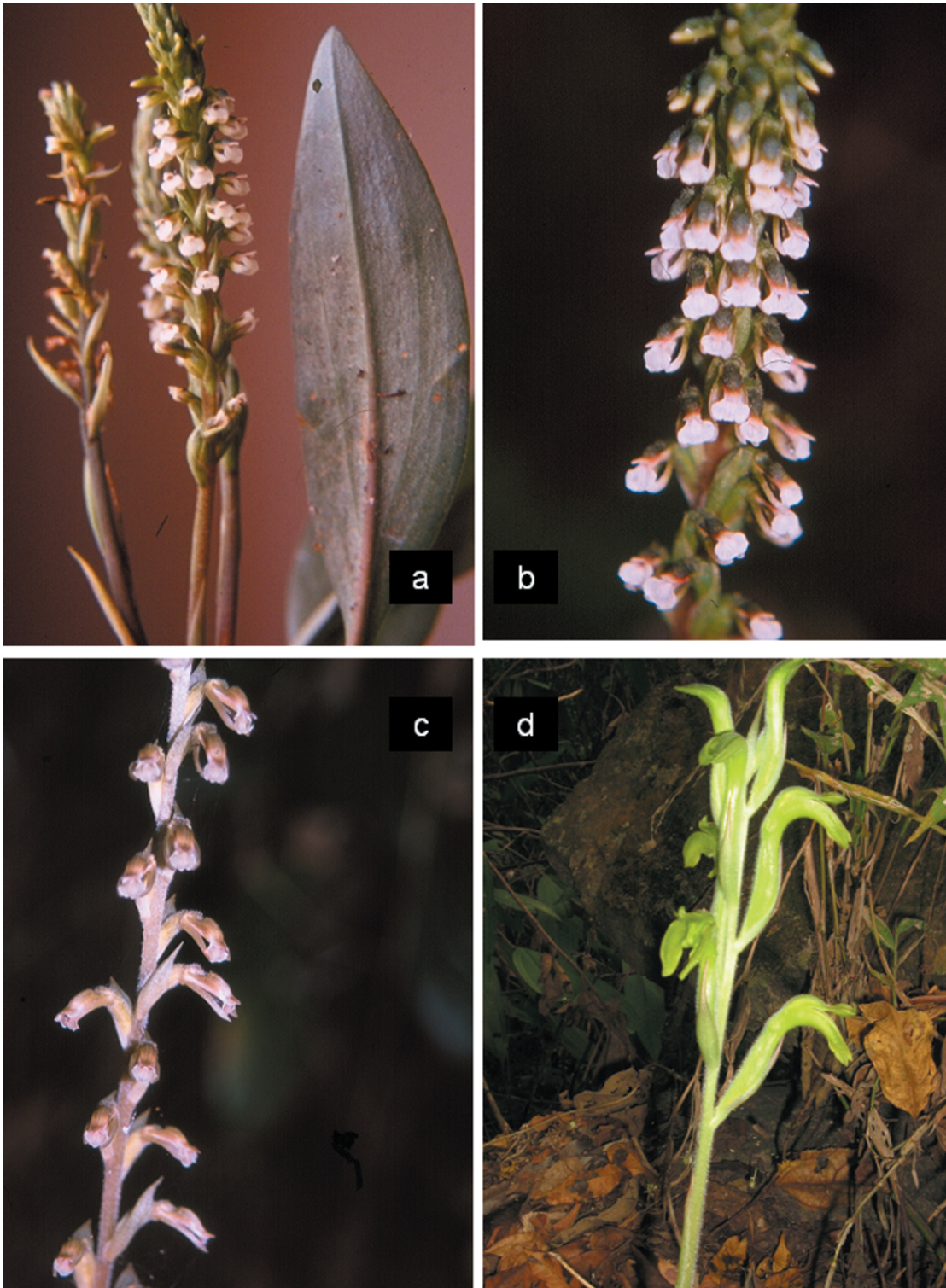


Figura 1. a,b- *Cyclopogon peruvianus* (Presl.) Schltr. a- Cundinamarca, Embalse de Guatavita (J.L. Fernández-Alonso et al. 26025, COL). b- Bogotá, planta cultivada (J.L. Fernández-Alonso) c- *Cyclopogon* sp. Cundinamarca, Bogotá, cerro de Usaquén (J. L. Fernández-Alonso). d- *Sarcoglottis grandiflora* (Lindl.) Klotzsch. Huila. Neiva, Centro La Tribuna (H. Dueñas et al. 3304, COL, SURCO).

s/n (B?), (**Schlechter**, 1920b). Distribución: regiones, VAIN; departamentos, Cau, 1000 m.

18.6. *P. hirta* (Poepp. & Endl.) Lindl., Beih. Bot. Centralbl. 37(2): 402, 1920. **Distribución:** regiones, CORI; departamentos, Cun, 2600 m. Colección testigo: **CUNDINAMARCA:** Madrid, Hacienda Casablanca, 11 jul 1999 (fl), *Y.A. Mora & R. Sánchez 155* (COL).

18.7. *P. laxa* (Poepp. & Endl.) Lindl., Gen. Sp. Orchid. Pl. 482, 1840. Basiónimo: *Stenorrhynchos laxum* Poepp. & Endl. Tipo: Perú: *Poeppig* s/n (T: W). Referencias: Citada para Colombia por **Dodson** (1992).

18.8. *P. leucosticta* (Rchb. f.) Garay & Dunst., Orchids of Venezuela 704, 1979. Basiónimo: *Spiranthes leucosticta* Rchb. f. Referencias: Especie venezolana, indicada también para Colombia por **Dodson** (1992).

18.9. *P. olivacea* Rolfe, Bull. Misc. Inform. 1891: 200, 1891. Especie ampliamente distribuida en Centro y Suramérica. **Distribución:** regiones, CCEN; departamentos, Cau, Val, entre 1000 y 1800 m. Colección testigo: **VALLE DEL CAUCA:** Zarzal, Hacienda El Medio, carretera La Paila-Armenia, 1000 m, 16 ene 1988 (fl, fr), *P. Silverstone-Sopkin et al. 3502* (CUVC).

18.10. *P. orobanchoides* (Kraenzl.) Schltr., Beih. Bot. Centralbl. 37(2): 404, 1920. **Distribución:** regiones, CORI; departamentos, Boy, Ces, Cun, entre 2200 y 2900 m. Colección testigo: **CUNDINAMARCA-BOYACÁ:** entre Villapinzón y Ventaquemada, 2800-2900 m, 30 mar 1953 (fl), *M. Schneider 679/1* (COL).

18.11. *P. palmorchidis* Szlach., Fragm. Florist. Geobot. 41(2): 859-861, 1996. Tipo: **TOLIMA:** Falán, Caño del Río Gualí, camino de Fresno a Falán, 1700-1120 m, 5 dic 1939 (fl, fr), *H. García Barriga 8336* (HT: COL). **Distribución:** regiones, CCEN; departamentos, Qui, Tol, entre 1120 y 1700 m. Colección testigo complementaria: **QUINDÍO:** Quimbaya, vereda La Carmelita, 1430 m, 30 jul 1987 (fl, fr), *G. Arbelaez et al. 2218* (HUQ).

18.12. *P. weberbauerii* (Kraenzl. ex Schltr.) Schltr., Repert. Spec. Nov. Regni Veg. Beih. 9: 131, 1921. **Distribución:** regiones, CCEN, PERI; departamentos, Ant, Ces, entre 2200 y 2500 m. Colección testigo: **CESAR:** Manaure, Serranía de Perijá. «El Cinco», 2200 m, 13 nov 1993 (fr), *O. Rangel et al. 11356A*. **SANTANDER** Chipatá, 2520 m, 18 oct 2007 (fl), *J.D. García 493* (COL).

18.13. *Pelexia* sp 1. **Distribución:** regiones, CHOC, CORI, PERI; departamentos, Ant, Ces, Put, entre 100 y 2000 m. Colección testigo: **PUTUMAYO:** Mocoa, Serranía de

Churumbelo, bocana del Río Ponchayaco, 600-100 m, 29 sep 2001 (fl, fr), *D. Cárdenas et al. 13325* (COAH).

18.14. *Pelexia* sp 2. **Distribución:** regiones PERI; departamentos, Ces, 2000 m. Colección testigo: **CESAR:** Serranía de Perijá, 2000 m, *O Haught 4509* (COL).

19. *Sarcoglottis* C. Presl (Figuras 1-d, 2-a,b).

Plantas con flores grandes, verdosas a amarillentas; sépalos laterales en su base completamente adnados y decurrentes sobre el ovario formando un espolón ovariano, sin línea de división evidente; columna delgada y relativamente larga, con pie muy largo, decurrente sobre el ovario e incluido dentro del espolón; antera elíptica, relativamente delgada, con el conectivo sobrepasando las tecas; clinandrio relativamente pequeño, membranoso; lóbulos estigmáticos amplios, con el rostelo terminal, membranoso y alargado, ápice truncado, con una pequeña muesca al caer el viscidio; viscidio redondeado; polínios con caudículas largas. **Distribución:** el género actualmente se encuentra formado por alrededor de 35 especies, distribuidas en las regiones tropical y subtropical del Nuevo Mundo. El género está representado en Colombia por diez especies, distribuidas en la amazonía, los Llanos orientales y las cordilleras Oriental y Occidental, entre 150 y 2800 m de altitud, más frecuente por debajo de 2000 m. Se encuentran preferentemente en sitios de bosque húmedo, pero es posible observarlas en sitios abiertos y en taludes al borde de carreteras, llegando pocas veces hasta el nivel de páramo (*Sarcoglottis maasorum* Pabst).

Una de las especies, *S. aphylla* (Sm.) Schletr., ha sido tratada recientemente por algunos autores dentro del género *Veyretia* Szlach. Este género está aparentemente más relacionado con *Cyclopogon* que con *Sarcoglottis* s. st. (**Szlachetko**, 1995; **Salazar**, 2003).

19.1. *Sarcoglottis acaulis* (Sm.) Schltr., Repert. Spec. Nov. Regni Veg. Beih. 6: 53, 1919. **Distribución:** regiones, AMAZ, COCC, VAIN; departamentos, Ama, Ant, Cas, Cun, entre 240 y 1850 m. **ANTIOQUIA.** Frontino, región de Murri, 1500-1850m, 12 dic 1988 (fl.) *G. McPherson 13475* (HUA, MO).

19.2. *S. aphylla* (Ridl.) Schltr., Beih. Bot. Centralbl. 37(2): 474, 1919. (= *Veyretia aphylla* (Ridl.) Szlach., Fragm. Florist. Geobot. 3:116.1995.) **Distribución:** regiones, ORIQ; departamentos, Vic, 150 m. Colección testigo: **VICHADA:** Orocué, Alrededor de 60 km al S, 60° E de Orocué, 150 m, 19 abr 1939 (fl), *O. Haught 2773* (COL).

19.3. *S. grandiflora* (Lindl.) Klotzsch (Figura 1-d), Allg. Gartenzeitung 10: 107, 1842. **Distribución:** regiones, CHOC, VAIN; departamentos, Cho, Hui, Put, Val. Colección testi-

go: **CHOCÓ**: Serranía del Baudó. may 1991. *G. Misas U.*, 59 (COL, HPUJ). **HUILA**: Neiva, Centro de investigaciones La Tribuna, Quebrada El Neme, 545 m, 25 may 2007, *H. Dueñas et al.* 3304 (COL, SURCO).

19.4. *S. homalogastra* (Rchb. f. & Warm.) Schltr., Beih. Bot. Centralbl. 37(11): 417, 1920. Referencia: Lámina 37 de la Real Expedición Botánica del Nuevo Reyno de Granada (**Fernández-P. & Schweinfurth**, 1963). Se considera que la planta dibujada durante la Expedición Botánica proviene de territorio colombiano. Especie indicada de también de Perú y Brasil por **Dodson** (1992).

19.5. *S. hunteriana* Schltr., Repert. Spec. Nov. Regni Veg. 17: 13, 1922. Tipo: Panamá: in Tälern zwischen Hügeln bei Panama City C.W. *Powell* 147 (LT: AMES; ILT: K, MO; HT at B destroyed). Referencia: Especie centroamericana que aparentemente está presente en territorio colombiano. Citada para Colombia por **Dodson** (1992).

19.6. *S. lehmannii* Garay, Bot. Mus. Leaf. 26(1): 22, 1978. Tipo: CAUCA: Timbiquí, *Lehmann s/n* (HT: K) (**Garay**, 1978b). **Distribución**: regiones, NUPA; departamentos, Cau.

19.7. *S. maasorum* Pabst., Bradea 3(3): 21. 1979. **Distribución**: regiones, CORI; departamentos, Cun, entre 2600 y 2800 m. Colección testigo: **CUNDINAMARCA**: Chocontá, Páramo El Sisga, 2600-2750 m, 16 abr 1963 (fl), *H. García-Barriga* 18025 (COL); Bogotá, Quebrada del Chicó, 2800 m, 27 dic 1943 *M. Schneider* 88 (COL).

19.8. *S. neglecta* Christenson., Lindleyana 6(3): 133. 1991. Tipo: Panamá: SAN JUAN, río Chagres, feb 1924 *Powel* 388 (HT AMES-28155). **Distribución**: regiones, CHOC; departamentos, Cho. Colección testigo: **CHOCÓ**: Serranía del Baudó. ene 1998. *G. Misas U.*, 301 (COL, HPUJ).

19.9. *S. stergiosii* Carnevali & I. Ramírez., Novon 3: 124. 1993. Tipo: Venezuela: Territorio Federal Amazonas, San Carlos de Río Negro, 100-120 m. jul 1982, *Stergios & Aymard* 4400 (HT: VEN). De presencia probable en Colombia en el sector de Guainía que limita con la localidad tipo.

19.10. *Sarcoglottis* sp. 1 (Figura 2-a,b). **Distribución**: regiones, NUPA; departamentos, Nar, entre 2000 y 2100 m. Colección testigo: **NARIÑO**: Tangua, Río Bobo, 2000-2100 m, 29 sep 2002 (fl, fr), *J.L. Fernández-Alonso* 19948 (COL).

E. Subtribu Stenorrhynchidinae Szlach. (Grupo "Stenorrhynchos")

Plantas con rostelo redondeado, duro y largo parecido a un pico, con el ápice cubierto por el viscidio alargado, en forma de capuchón; rostelo remanente subulado; polínios

2, bipartidos. Para Colombia se registran 9 géneros y 15 especies.

20. *Coccineorchis* Schltr.

Plantas terrestres, herbáceas, hojas elípticas, con pecíolo bien diferenciado, generalmente variegadas o al menos discoloras. Inflorescencia terminal, espiciforme; brácteas inferiores del escapo foliaceas, las demás normales. Flores y brácteas florales rojas, carnosas, flores resupinadas, sésiles, subdensamente dispuestas, secundarias, ascendentes a casi adpresas; labelo unguiculado y en la base del disco un par de aurículas glandulares; polínios con caudículas inconspicuas. **Distribución**: del género *Coccineorchis* se conocen siete especies distribuidas en los Andes de Centro y Sur América (**Rutkowski et al.**, 2004b). En Colombia se presentan tres especies en pequeñas localidades de las tres cordilleras, el Chocó biogeográfico y en la Costa Atlántica, prácticamente desde el nivel del mar hasta 3200 m de altitud, pero mucho más frecuente por encima de 2000 m.

20.1. *Coccineorchis cernua* (Lindl.) Garay, fl. Ecuador 9: 237, 1978. **Distribución**: regiones, CARI, CCEN, CHOC, COCC, CORI; departamentos, Atl, Boy, Cau, Cho, Cun, Ris, San, Val, entre 60 y 3200 m. Colección testigo: **BOYACÁ**: Chinavita, Cerro Mamapacha, 3000 m, 27 jul 2001 (fl), *H. Dueñas, et al.* 3108 (COL). **SANTANDER**: Velez, 2603 m, 17 oct 2007, *L.E. Serralde* (COL).

20.2. *C. cristata* Szlach. Rutk. & Mytnik, Ann. Bot. Fennici 41: 482-483, 2004. Tipo: Panamá: Cerro Jefe, ca. 800 m, 16 dec 1972, *Dressler* 4233 (HT: FLAS) (**Rutkowski et al.**, 2004b). Posiblemente presente en Colombia en la zona del Darién chocono.

20.3. *C. cf. navarrensis* (Ames) Garay, Bot. Mus. Leaf. 28(4): 306. 1980 (1982). **Distribución**: CHOC; departamentos, Cho. Colección testigo: **CHOCÓ**: Serranía del Darien, frontera Panamá-Colombia, 1250-1450 m, 26 ene 1975 (fl), *A. Gentry & S. Mori* 13910 (COL, MO).

21. *Cybebus* Garay. (Figura 3-a,d).

Plantas con hojas conspicuamente pecioladas; escapo con tres brácteas muy largas y distanciadas. Inflorescencia con pocas flores muy grandes para el tamaño general del grupo (8-9 cm long); ovario totalmente erecto, con verticilos florales arqueados hasta quedar divaricados; sépalos en la base tubulares; columna larga, arqueada hacia abajo, la base connada con los sépalos laterales, con un largo pie decurrente sobre el ápice del ovario; antera ovada, ápice caudado y recurvado; rostelo trilobulado, lóbulos laterales carnosos, el terminal en forma de pico, el cual está



Figura 2. a,b- *Sarcoglottis* sp. 1. Nariño, Tangua, Río Bobo (J.L. Fernández-Alonso 19948, COL). c,d- *Lyroglossa grisebachii* (Cogn.) Schltr., Santander, Mesa de Los Santos (J.L. Fernández-Alonso & S. Albesiano 24340A COL).

Cybebus grandis

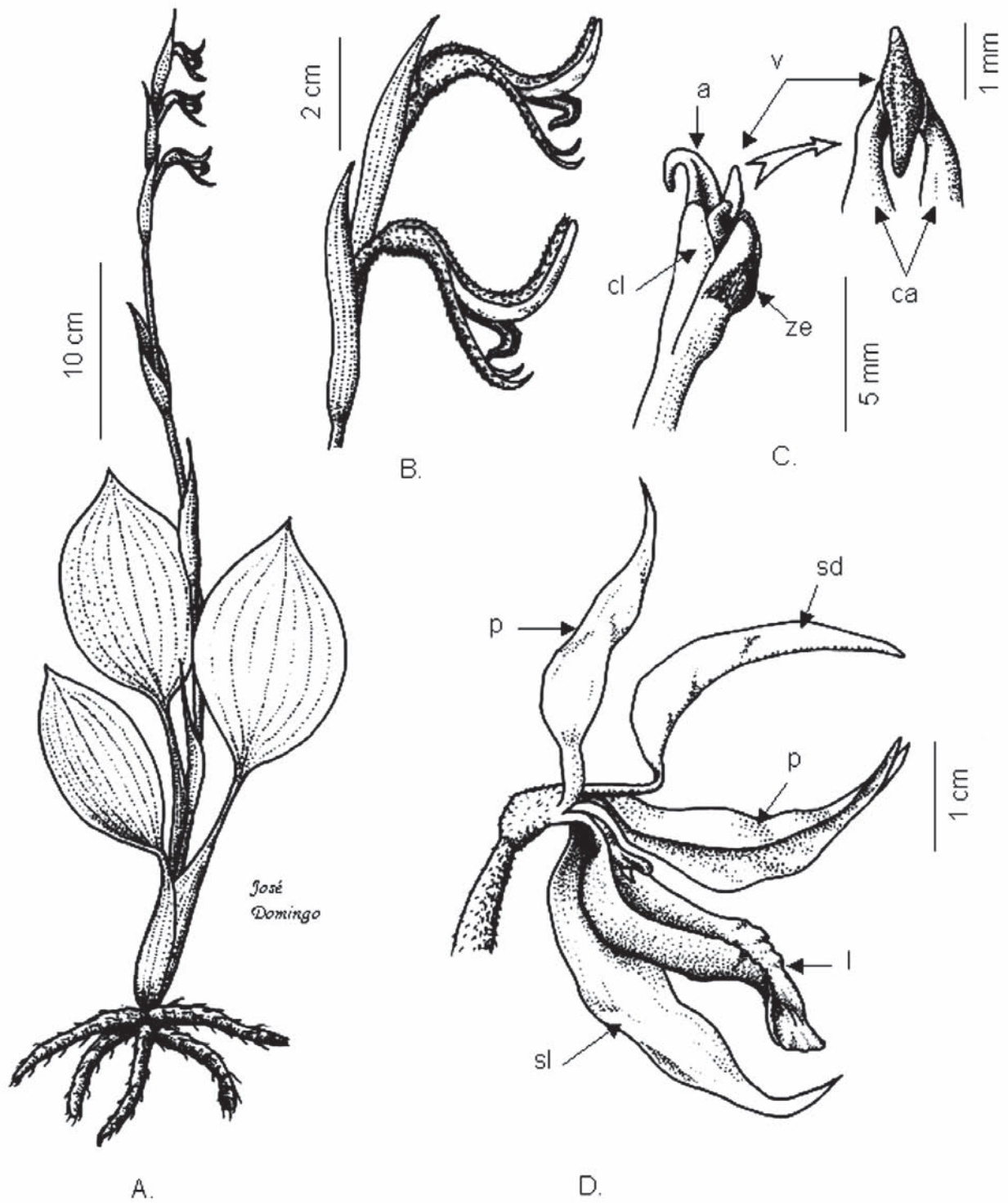


Figura 3. a,d- *Cybebus grandis* (Lindl.) Garay.: A. hábito; B. detalle inflorescencia; C. ginostemo; D. detalle de la flor. a: antera, ca: caudículas, cl: clinandrio, l: labelo, p: pétalos, v: viscidio, sd: sépalo dorsal, sl: sépalos laterales, ze: zona estigmática. (Dibujado a partir de G. Galeano et al. 2650 (COL).

cubierto por el viscidio. **Distribución:** una sola especie endémica de Colombia. Referencias bibliográficas: **Garay**, 1978b.

El género *Cybebus* es colocado por **Dressler** (1993) y **Szlachetko** (1995) dentro de la subtribu *Spiranthinae*, pero al revisar el material de los herbarios colombianos, presenta en nuestro concepto más afinidades con *Lankesterella*, por tener el rostelo trilobulado, con el lóbulo medio alargado en forma de pico, además, la estructura del rostelo y viscidio se acomoda más con aquella de los miembros de *Stenorrhynchidinae*, es decir, con el rostelo alargado semejante a un pico y el viscidio como una capucha que lo envuelve, de tal manera que al caer éste el rostelo remanente es subulado; por estas razones se propone su ubicación dentro de esta subtribu.

21.1. *Cybebus grandis* Garay, Bot. Mus. Leaf. 26: 15, 1978. Tipo: **CAUCA:** El Tambo, Cerca al Lago El Tambo, Munchique, s/f (fl), *K. von Sneidern 731* (HT: S). **Distribución:** regiones, COCC; departamentos, Cau, Ris, entre 1600 y 1800 m. Colección testigo: **RISARALDA:** Mistrató, 1600-1800 m, 21 mar 1991(fl), *G. Galeano & al. 2650* (COL).

22. *Eltroplectris* Raf.

Plantas con hojas relativamente grandes (15-22 x 5-7 cm), espatuladas, con la base decurrente sobre el corto pecíolo. Flores grandes, rojas y con un espolón bien evidente formado por la unión de más de la mitad basal de los sépalos laterales y el pie de la columna; en el ápice del pie sale el labelo que queda incluido dentro del espolón, pero no hace parte estructural del mismo; antera ovada, con un corto filamento libre del clinandrio, este último sin márgenes membranosos; zona estigmática con 2 lóbulos muy amplios; rostelo alargado, casi piramidal; polinios con largas caudículas. **Distribución:** del género *Eltroplectris* se conocen alrededor de diez especies (**Szlachetko & Tamayo**, 1996), nativas de las regiones tropical y subtropical de América, desde el sur de Estados Unidos, a través de Centroamérica, hasta Brasil en Sudamérica y en las Antillas. En Colombia se conoce una sola especie de la región amazónica.

22.1. *Eltroplectris calcarata* (Sw.) Garay & H. R. Sweet, J. Arnold Arbor. 53(3): 390, 1972. **Distribución:** regiones, AMAZ; departamentos, Ama, 240 m. Colección testigo: **AMAZONAS:** Mirití, Río Caquetá, La Pradera, 240 m, 1 oct 195 (fr) 2, *H. García Barriga 14583* (COL).

23. *Lankesterella* Ames.

Plantas epífitas, pequeñas, con hojas basales, sésiles. Inflorescencia de pocas flores, densamente pubescente;

sépalos laterales connados en la base formando un mentum prominente, sépalo dorsal erguido, libre de los pétalos; labelo connado en la base con la columna; columna corta, inclinada, con corto pie confluyente con la base del labelo; rostelo trilobado, lóbulo medio largo, dentado, subulado. **Distribución:** Se conocen alrededor de diez especies nativas de la región tropical de América. Para Colombia se registra una sola especie.

23.1. *Lankesterella orthantha* (Kraenzl.) Garay, Caldasia 8(40): 521, 1962. **Distribución:** regiones, COCC; departamentos, Ris, 2000 m. Tipo: Ecuador: entre Masacca y Loja, 2000 m, *F.C. Lehmann s.n.* (W). Referencia: **RISARALDA:** Río Consota, límite suroccidental del Parque Regional Natural Ucumari, 2000 m (**De Wilde**, 1994, **Ortiz** (1995)). Especie distribuida en Centro y Suramérica.

24. *Lyroglossa* Schltr.

Plantas pequeñas con pocas hojas basales, a veces inconspicuas. Inflorescencia de pocas flores, pequeñas, finamente pubescentes; con sépalos libres, los laterales con ápice recurvado; columna corta; rostelo rígido, acuminado. **Distribución:** género con dos o tres especies (**Szlachetko**, 1994a; **Salazar**, 2003), en Centro y Sudamérica, desde México hasta Paraguay. En Colombia se encuentra una sola especie, que aunque había sido referida en la literatura como especie probable (**Ortiz**, 1995), hasta la fecha, su registro no había sido sustentado por muestras de colección reales. La que se indica a continuación, representa el primer registro corológico de este género para Colombia.

24.1. *Lyroglossa grisebachii* (Cogn.) Schltr. (Figura 2-c,d), Anexos Mem. Inst. Butantan, Secc. Bot. 1(2): 27, 1921. **Distribución:** regiones CORI; departamento San, 1685-2150 m. Colección testigo: **SANTANDER:** Municipio de Los Santos, vía de Los Santos a Curos, 1685 m, 9 jul 2006 (fl), *J.L. Fernández-Alonso & S. Albesiano 24340A* (COL). La planta fue encontrada en ambientes abiertos, con humedad edáfica y con vegetación de tipo sabana.

25. *Mesadenella* Pabst & Garay.

Plantas con inflorescencia muy larga y delgada, flores pequeñas muy esparcidas, arqueadas, partes florales cortas y a primera vista en el ápice obtusas, poco vistosas; antera ovada, muy carnosa, sobrepasando en longitud al rostelo; zona estigmática casi trapecoide, rostelo terminal, relativamente corto; viscidio alargado, en forma de bastón, más largo que el rostelo; polinios sin caudículas. **Distribución:** se conocen siete especies nativas de América tropical y subtropical, desde Guatemala hasta Brasil. En

Colombia se encuentra una sola especie, en localidades a lo largo del piedemonte de la cordillera Oriental, entre 200 y 2500 m de altitud.

25.1. *Mesadenella cuspidata* (Lindl.) Garay, fl. Ecuador 9(1): 238, 1978. **Distribución:** regiones, CARI, CORI; departamentos, Cun, Gra, Met, Put, 200-1465 m. Colección testigo: **LA GUAJIRA:** Caraipa, 200 m, 23 nov 1953 (fl), *R. Romero-Castañeda 4403* (COL).

26. *Pteroglossa* Schltr.

Plantas con hojas elípticas a obovadas, con la base gradualmente atenuada en un poco distinguible peciolo. Flores vistosas, carnosas, variadamente coloreadas, desde verde-blanquecino a rosadas, con un espolón formado por la unión de los sépalos laterales, el pie de la columna y la uña del labelo; antera ovada, sin filamento evidente, clinandrio con márgenes membranosos que cubren la base de la antera; zona estigmática en forma de "U" invertida, bilobada, lóbulos amplios en la base; rostelo triangular; polínios sin caudículas. **Distribución:** Se conocen diez especies del género *Pteroglossa*, distribuidas desde México, a través de Centroamérica y en Sudamérica (Salazar, 2003). En Colombia se encuentra una sola especie.

26.1. *Pteroglossa rosealba* (Rchb. f.) Salazar & M. W. Chase., Lindleyana 17 (3): 176. 2002. Tipo: Venezuela. Caracas, *Wagner s.n.* (HT: W-R). **Distribución:** regiones, CORI; departamentos: Nsa. Colección testigo: **NORTE DE SANTANDER:** sin datos (*Schlechter*, 1920a; *Dunsterville & Garay*, 1959).

27. *Sacoila* Raf. (Figura 4-a,b).

Planta áfila en floración. Inflorescencia terminal, levemente pubescente. Flores pardas a rojas; sépalos laterales oblicuos, decurrentes sobre el ovario y unidos con el pie de la columna y la base del labelo formando un espolón prominente. Pie de la columna relativamente largo, decurrente sobre el ovario; estigma orientado en un plano oblicuo hacia el ápice de la columna, con su borde inferior prominente en vista lateral. **Distribución:** El género con de 10 especies ampliamente distribuidas en el Neotrópico, desde el sur de Estados Unidos, a través de Centroamérica, las Antillas y Suramérica, excepto en Chile (*Szlachetko*, 1994b; *Salazar*, 2003). En Colombia se encuentra una sola especie, distribuida a lo largo de las tres cordilleras, el Chocó biogeográfico y los Valles interandinos, prácticamente desde el nivel del mar, hasta 3180 m de altura. Las plantas colombianas se adscriben a la variedad *squamulosa* (Humb., Bonpl. & Kunth) Szlach., basada en *Neottia squamulosa* descrita de la costa atlántica de Colombia (*Szlachetko*, 1994b).

27.1. *Sacoila lanceolata* (Aubl.) Garay, var. *squamulosa* (Humb., Bonpl. & Kunth) Szlach. (Figura 4-a,b). *Fragm. Flor. Geobot.* 39: 437. 1994. **Distribución:** regiones, CCEN, CHOC, COCC, CORI, VAIN; departamentos, Ant, Boy, Cas, Cau, Ces, Cho, Cun, Gra, Met, San, 20-3180 m. Colección testigo: **SANTANDER:** Suaita, San José de Suaita, 1700 m, 9 abr 2003 (fl), *J.L. Fernández-Alonso 20468* (COL, HUA).

28. *Stenorrhynchos* Rich. (Figuras 4-c,d, 5-a,b,c,d,e).

Plantas con hojas obovado-espátuladas, variegadas, base del limbo decurrente sobre el peciolo, a veces áfilas en época de floración. Inflorescencia de flores grandes y vistosas, rojo-blancuzcas, las brácteas bien evidentes, coloradas, de tamaño similar al de las flores; sépalos laterales unidos en la base y decurrentes sobre el ápice del ovario formando, junto con el pie de la columna un mentum prominente, columna larga, con pie corto, pubescente sobre la superficie dorsal debajo de la zona estigmática; polínios con caudículas. **Distribución:** El género consta de alrededor de 30 especies nativas de las regiones tropical y subtropical de América, con especies desde Estados Unidos y a través de Centroamérica y El Caribe, hasta Argentina. En Colombia se encuentran cinco especies, distribuidas en los departamentos de las tres cordilleras, el Nudo de los Pastos, la Sierra Nevada de Santa Marta, y la Serranía de Perijá, desde 950 hasta 3900 m de altitud.

28.1. *Stenorrhynchos albidomaculatum* Christenson. (Figura 4-c). *J. Orchideenfreund*, 12(1): 12-16, photos. 2005. Tipo: **SANTANDER:** Quebrada de País, N of La Baja, 3200 m, 31 Jan 1827, *E. P. Killip & A. C. Smith 18776* (HT: NY). **Distribución:** regiones, CORI; departamentos, Boy, Cun, San, 1990-3300 m. Colección testigo: **BOYACÁ:** Villa de Leyva, Santuario de Flora y Fauna de Iguaque, Cabaña Carrizal, 2740 m, 25 mar 1993 (fr), *J. Betancur et al. 4000* (COL).

28.2. *S. af. speciosum* (Jacq.) L. C. Rich. (Figuras 4-d, 5-a). *Syst. Veg.* 3: 709, 1826. **Distribución:** regiones, CCEN, COCC, CORI, NUPA; departamentos, Ant, Boy, Cal, Cun, Gra, Hui, Nar, Nsa, Sant, Val, 1450-3900 m. Colección testigo: **HUILA:** Campoalegre, El Roble, carretera Chía-Pando, 1720 m, 19 may 2001 (fl), *F. Llanos & A. Araujo 3168* (COL, SURCO).

28.3. *S. vaginatum* (H.B.K.) Spreng. (Figura 5-b,c,d,e). *Syst. Veg.* 3: 710, 1826. **Distribución:** regiones, CORI, PERI, SNSM; departamentos, Ara, Boy, Ces, Cun, Gra, Mag, Nsa, San, 2560-3800 m. Colección testigo: **BOYACÁ:** Pesca, Páramo de la Cortadera, 3750 m, 10 dic 1981 (fl, fr), *M. Bejarano 079* (UPTC); ibídem, vía Pesca a Toca, 3600 m, 14-VIII-2007, *J.L. Fernández-Alonso 25580* (COL).

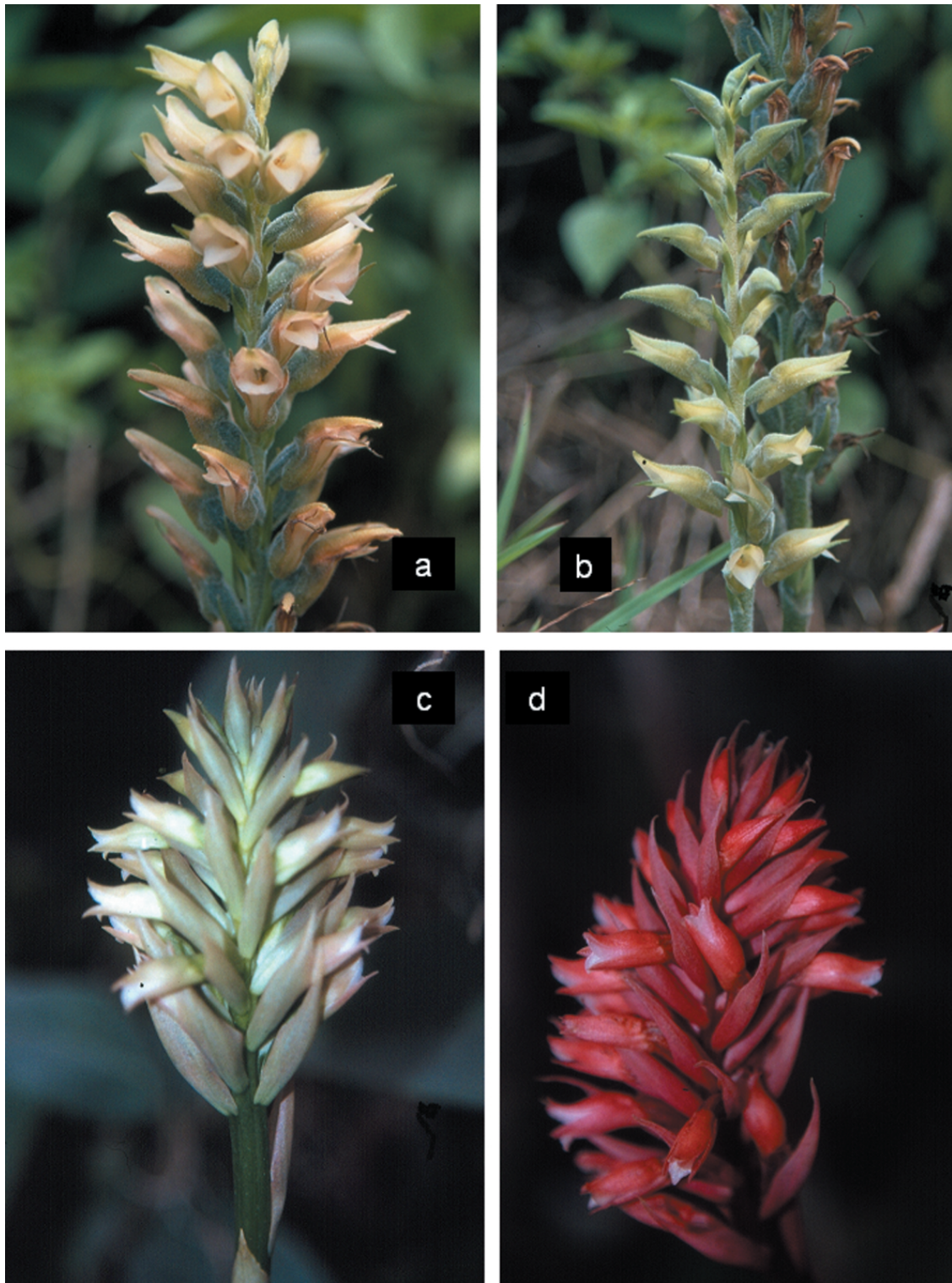


Figura 4. a,b- *Sacoila lanceolata* (Aubl.) Garay, var. *squamulosa* (Humb., Bonpl. & Kunth) Szlach., Santander, San José de Suaita (J.L. Fernández-Alonso 20468, COL, HUA). c- *Stenorrhynchos* cf. *albidomaculatum* Christenson, Cundinamarca, Jardín Botánico de Bogotá, cultivada (J.L. Fernández-Alonso). d- *Stenorrhynchos* af. *speciosum* (Jacq.) L. C. Rich. Cundinamarca, Jardín Botánico de Bogotá, cultivada (J.L. Fernández-Alonso)

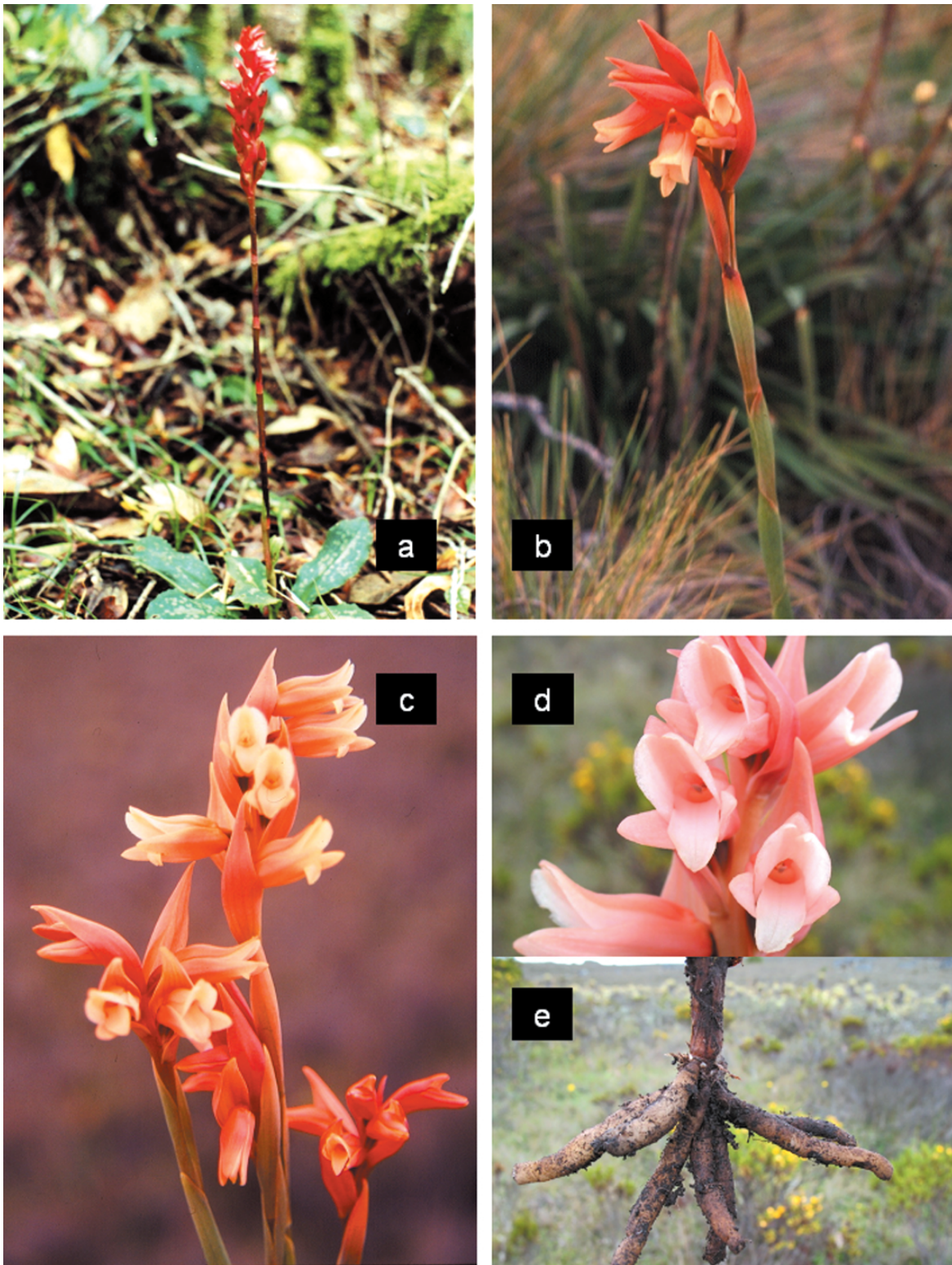


Figura 5. a- *Stenorrhynchos* *af. speciosum* (Jacq.) L. C. Rich. Bogotá, Cerro La Conejera (Cundinamarca, H. Dueñas 3080 COL). b- *Stenorrhynchos vaginatum* (H. B. K.) Spreng. Guatavita (Cundinamarca, J.L. Fernández-Alonso). c,d,e- *S. vaginatum*, Páramo de La Cortadera (Boyacá, J.L. Fernández-Alonso 25580).

28.4. *Stenorrhynchos* sp. 1. Distribución: regiones, CORI, SNSM; departamentos, Ces, Gra, Mag, Nsa, 950-1800 m. Colección testigo: **MAGDALENA:** Santa Marta, Zona de San Lorenzo, 1300 m, 27 ene 2001 (fl), *A. Osorio 144* (COL).

28.5. *Stenorrhynchos* sp. 2. Distribución: regiones, CORI; departamentos, Cun, 2650 m. Colección testigo: **CUNDINAMARCA:** Bogotá, vereda Torca, Usaquén, 2650 m, 14 feb 2000 (fl), *C. Bernal & S. Castro 530* (COL).

F. Tribu Cranichideae Endl. (Grupo “*Cranichis*”)

Plantas con superficie estigmática horizontal, rodeada por un borde engrosado que le da forma de copa; viscidio con háculo, polinios 4, con caudículas. Pueden distinguirse dos subgrupos, el primero conformado por *Baskervilla* Lindl., *Ponthieva* R. Br. y *Pseudocentrum* Lindl., con hojas bien desarrolladas, basales, a menudo variegadas, flores medianas, no resupinadas; labelo y pétalos unidos con la columna, y a menudo encerrados por los sépalos; y el segundo con *Cranichis* Sw. y *Pterichis* Lindl., algunas de sus especies con hojas ausentes en floración, flores relativamente pequeñas, sépalos y pétalos libres, labelo cóncavo a galeado con venas bien marcadas, generalmente con coloraciones llamativas.

29. *Baskervilla* Lindl.

Plantas con pétalos dolabriformes, dorsalmente unidos a la columna; labelo unguiculado, profundamente saccado, lobulado, los lóbulos laterales reclinados; columna larga, recta; antera ovada, con filamento evidente; rostelo alargado, puntudo, con viscidio redondeado, negruzco, apical; polinios desiguales, los internos más pequeños. **Distribución:** Se conocen seis especies nativas de los Andes de Sudamérica y una en Brasil. En Colombia se encuentran tres especies, distribuidas en algunas localidades de las tres cordilleras colombianas, entre 1000 y 3000 m de altitud.

29.1. *Baskervilla assurgens* Lindl., Gen. Sp. Orchid. Pl. 505, 1840. Tipo: PERÚ: *Mathews 1888* (Lindley, 1830-1840). Referencia: citado para Colombia por **Ortiz** (1995).

29.2. *B. colombiana* Garay, Svensk Bot. Tidskr. 47: 196, 1953. **Distribución:** regiones, CCEN, COCC, CORI, NUPA; departamentos, Ant, Cau, Hui, Nar, 1050-3000 m. Colección testigo: **CAUCA:** Santa Rosa, Inspección de Santa Marta, 1050-1150 m, 22 jun 2002 (fl), *B. R. Ramírez et al. 16130* (CAUP, COL).

29.3. *B. venezuelana* Garay & Dunst., Venez. Orchid. Ill. 6: 52, 1976. **Distribución:** regiones, COCC; departamentos, Ant, 2100 m. Colección testigo: **ANTIOQUIA:** Támesis,

vereda Río Frío, 2100 m, 9 nov 1989 (fl), *R. Fonnegra et al. 3223* (HUA).

30. *Cranichis* Sw. (Figura 6-a,b).

Hierbas en general pequeñas y delgadas; hojas frecuentemente 1 o 2 basales, algunas veces tanto basales como caulinares o ausentes en floración; flores pequeñas, espaciadas en el eje floral (en *Cranichis wagneri* Rchb. f. agrupadas en una pseudoumbela), verdosas o blancuzcas, sésiles o muy cortamente pediceladas, casi divaricadas, con el ápice levemente arqueado hacia abajo; sépalos y pétalos libres; labelo elíptico a orbicular o casi galeado, fuertemente cóncavo o en la base saccado; columna relativamente corta y gruesa, con una pequeña uña; clinandrio ancho y membranoso; rostelo relativamente alargado y endurecido, el viscidio terminal redondo y oscuro; háculo grueso y alargado; polinios clavados, caudículas inconspicuas. **Distribución:** se conocen alrededor de 30 especies, nativas de las regiones tropical y subtropical de América, desde el sur de Estados Unidos hasta Brasil y en las Antillas. En Colombia se encuentran 20 especies, entre 100 y 3900 m de altitud, con algunas especies (*Cranichis fertilis*, *C. lehmannii*, y *C. muscosa*) principalmente por debajo de 2000 m de altitud, en las tres cordilleras colombianas. Son plantas terrestres frecuentes en el sotobosque de bosque andino y en matorrales de páramo y subpáramo, siempre asociadas con sitios húmedos y musgosos, aunque pueden encontrarse en sitios abiertos muy intervenidos como potreros, taludes o en sitios rocosos. Un estudio importante sobre el género para Colombia lo realizó **Schneider** (1953).

De acuerdo con G. Salazar (com. pers.), la especie *Cranichis fertilis* (F. Lehm. & Kraenzl.) Schltr., se ha propuesto para ser transferida al género *Ponthieva*, basándose en la estructura de la columna y en la morfología del labelo de esta especie atípica.

30.1. *Cranichis antioquiensis* Schltr., Repert. Spec. Nov. Regni Veg. Beih. 7: 57, 1920. Tipo: **ANTIOQUIA:** 2000 m, s/f, M. Madero, s/n. **Distribución:** regiones, COCC, CORI, NUPA, SNSM; departamentos, Ant, Boy, Cau, Ces, Cun, Nar, Val, 1730-3100 m. Colección testigo: **CUNDINAMARCA:** Sesquilé, Laguna (antigua) de Guatavita, 3000 m, 3 oct 1995 (fl), *J.L. Fernández-Alonso & al. 12698, 12700* (COL).

30.2. *C. asplundii* Garay, Canad. J. Bot 34: 248. 1956. Tipo: Ecuador: NAPO-PASTAZA: between Cosanga and Guacamayo. Oct 1939, *E. Asplund 9553* (S). De acuerdo con Salazar (com. pers.), esta planta, a menudo tratada dentro del género *Solenocentrum* Schltr., *S. asplundii* (Garay) Garay, también llega a territorio colombiano.

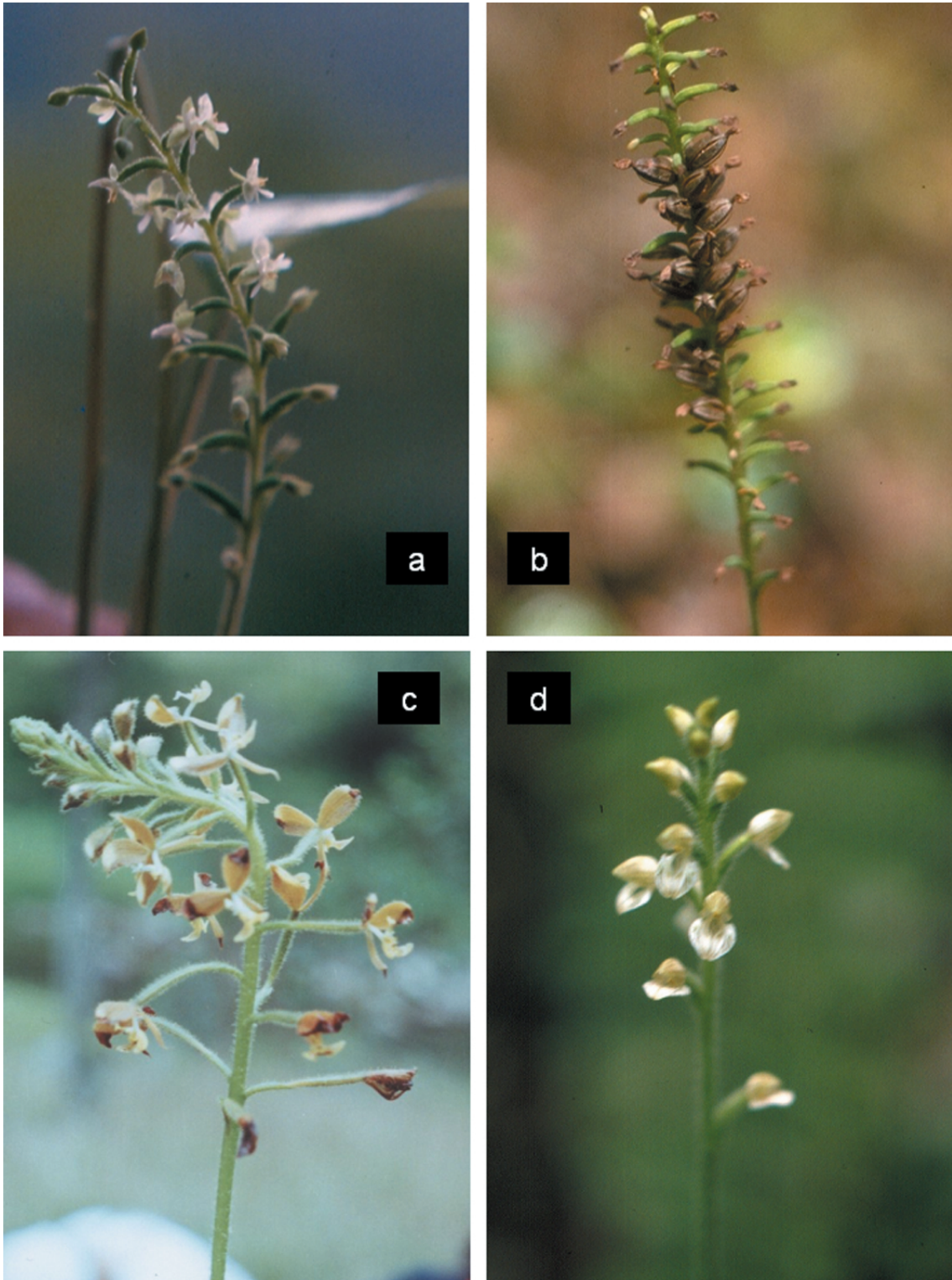


Figura 6. a- *Cranichis diphylla* Sw. Norte de Santander. Toledo, San Bernardo de Bata (J.L. Fernández-Alonso et al. 11812, COL). b- *Cranichis* cf. *fertilis* (F. Lehm. & Kraenzl.) Schltr. Cundinamarca. Laguna de Guatavita (J. L. Fernández-Alonso). c- *Ponthieva diptera* Rchb. & Linden. Boyacá, Arcabuco, Río Pómeca (H. Dueñas, 3082 COL). d- *P. similis* C. Schweinf., Cundinamarca, Sesquilé, Laguna vieja de Guatavita (J.L. Fernández-Alonso18916 COL).

30.3. *C. brachyblephara* Schltr., Repert. Spec. Nov. Regni Veg. Beih. 7: 58, 1920. Tipo: **CAUCA**: 3000 m, s/f, M. Madero, s/n. (**Schlechter**, 1920b). **Distribución**: regiones, NUPA; departamentos, Cau, 3000 m.

30.4. *C. calva* (Kraenzl.) Schltr., Repert. Spec. Nov. Regni Veg. Beih. 9: 128, 1921. **Distribución**: regiones, CCEN, NUPA; departamentos, Cau, Nar, Tol, 2100-3200 m. Colección testigo: **NARIÑO**: Pasto, corregimiento del Encano, Isla La Corota, 2800 m, 6 may 1988 (fl), *O. de Benavides 9814* (COL, PSO).

30.5. *C. ciliata* (Kunth) Kunth, Synopsis Plantarum 1: 324, 1822. **Distribución**: regiones, CCEN, COCC, CORI, NUPA, SNSM; departamentos, Ant, Boy, Cal, Cau, Cun, Hui, Mag, Nar, Sant, Ris, Val, 1780-3900 m. Colección testigo: **CUNDINAMARCA**: Mesitas, Abajo del Salto de Tequendama, 2100 m, 31 oct 1965 (fl), *L. Uribe Uribe 5451* (COL).

30.6. *C. crumenifera* Garay, Caldasia 8: 518, 1962. **Distribución**: regiones, CORI; departamentos, Cun, 2600-2700 m. Colección testigo: **CUNDINAMARCA**: Sopó, 2600-2700 m, 19 sep 1952 (fl), *Martín Schneider 643* (HT: COL, AMES).

30.7. *C. diphylla* Sw. (Figura 6-a) Nov. Gen. et Sp. Pl., Prodr. 120, 1788. (*C. ovatilabia* Schtr.). **Distribución**: regiones, CCEN, COCC, CORI, NUPA, PERI; departamentos, Ant, Boy, Cau, Cho, Cun, Gra, Nar, Nsa, Sant, Tol, 1750-3550 m. Colección testigo: **BOYACÁ**: Duitama, páramo de La Rusia, 3550 m, 21 nov 1994 (fl), *J.L. Fernández-Alonso et al. 12084* (COL).

30.8. *C. engelii* Rchb. f., Linnaea 41: 19, 1876. **Distribución**: regiones, CCEN, COCC, CORI; departamentos, Ant, Cun, 2010-2800m. Colección testigo: **ANTIOQUIA**: Frontino, Km 12 de la vía Nutibara-Murri, 2010 m, 23 sep 1987 (fl, fr), *J. L. Zarucchi et al. 5694* (COL, HUA, MO).

30.9. *C. fertilis* (F. Lehm. & Kraenzl.) Schltr. (Figura 6-b) Repert. Spec. Nov. Regni Veg. Beih. 8: 115, 1921. (= *Ponthieva fertilis* (F. Lehm. & Kraenzl.) Salazar comb. Ined.; *C. pycnantha* Schltr.). **Distribución**: regiones, CCEN, CHOC, COCC, CORI, NUPA; departamentos, Ant, Cal, Cau, Cho, Cun, Hui, Nar, Nsa, Put, Sant, Tol, Val, 800-2600 m. Colección testigo: **PUTUMAYO**: Villa Garzón, Carretera a Puerto Asís, 4 may 1994, *J.L. Fernández-Alonso & al. 11456* (fl).

30.10. *C. gibbosa* Lindl., Ann. Mag. Nat. Hist. 15: 385, 1845. Tipo: Ecuador: PICHINCHA, *Hartweg 1435* (HT: K). Referencia: Citada para Colombia por **Dodson** (1992).

30.11. *C. lehmanniana* (Kraenzl.) L. O. Williams, Lilloa 3: 477, 1938. (*C. cucullata* Schltr.). **Distribución**: regiones,

CORI, NUPA; departamentos, Boy, Cau, Cun, Nar, Put, Sant, 2200-3700 m. Colección testigo: **NARIÑO**: La Cruz, Corregimiento de Alto Mayo, 2880 m, 11 jul 1999, *S. L. Díaz-Ibarra 252* (fl) (CAUP).

30.12. *C. lehmannii* Rchb. f., Otia Bot. Hamburg. 1: 4, 1878. (*C. cylindrostachys* Schltr.) **Distribución**: regiones, CCEN, COCC; departamentos, Ant, 1000-1710 m. Colección testigo: **ANTIOQUIA**: Frontino, Corregimiento de Nutibara, zona de Murri, Alto de Cuevas, 1000-1850 m, 14 feb 1991, *R. Callejas et al. 9899* (fr) (HUA).

30.13. *C. muscosa* Sw., Nov. Gen. et Sp. Pl., Prodr. 120, 1788. **Distribución**: regiones, CARI, CCEN, CHOC, COCC, CORI; departamentos, Ant, Bo, Cho, Nsa, Qui, Sand 100-2000 m. Colección testigo: **BOYACÁ**: Santa María, 800 m, 8 oct 2000, *J. Betancur 8748* (COL). **CHOCÓ**: Carretera Ansermanuevo-San José del Palmar, 8,4 km del Alto del Galápago, 1600 m, 19 feb 1977, *E. Forero et al. 3016* (fl) (COL).

30.14. *C. parvula* Renz, Candollea 11: 259, 1948. **Distribución**: regiones, COR, ORIQ; departamentos, Boy, Met, 500-700m. Referencia: la especie se conoce para Colombia de los ejemplares mencionados en la descripción original realizada por **Renz** (1948): **BOYACÁ**: Arenas Blancas, El Secreto, 500 m, 10 oct 1938, *O. Renz 4159* (Hb. Renz)). **META**: Río La Cal, 500-700 m, sep 1939, *O. Renz 4124* (HT: Hb. Renz).

30.15. *C. picta* Rchb. f., Linnaea 41: 52, 1876. Tipo: Ecuador: PICHINCHA: 2700 m, *Jameson s.n.* (HT: W). Referencia: Citada para Colombia por **Dodson** (1992).

30.16. *C. polyantha* Schltr., Repert. Spec. Nov. Regni Veg. Beih. 7: 61, 1920. Tipo: **CAUCA**: Sin localidad precisa, s/f, *Madero 22* (AMES) (**Schlechter**, 1920b). **Distribución**: regiones, NUPA; departamentos, Cau, Caq. Colección testigo: **CAUCA**: El Tambo, PNN Munchique, s/f, *Beatriz Salgado N. 145, 401A, 486* (fl) (CAUP). Se incluye bajo este nombre, a *C. polyantha* Schltr. var. *caquetensis* Renz, Candollea 11: 262. 1948 (Tipo: **CAQUETÁ**: entre San Vicente y Campo Alegre, 2000 m, mar 1939, *O. Renz 4162* (RENZ)).

30.17. *C. pulvinifera* Garay, fl. Ecuador 9: 204, 1978. Tipo: **PUTUMAYO**: 2.5 km SE of Colón, *Bristol 1227* (HT: AMES) (**Garay**, 1978a).

30.18. *C. schlimii* Rchb. f., Linnaea 41: 19, 1876. **Distribución**: regiones, CCEN, CORI, NUPA; departamentos, Cun, Nar, Val, 2700-3000 m. Colección testigo: **CUNDINAMARCA**: Bogotá, Quebrada de El Chicó, 2700-2800 m, 18 may 1944 (fl, fr), *M. Schneider 11* (1) (COL).

30.19. *C. tenuiflora* Griseb., Cat. Pl. Cub. 268, 1866. **Distribución:** regiones, CCEN, CORI, NUPA; departamentos, Ant, Nsa, Put, 1750-2600 m. Colección testigo: **ANTIOQUIA:** Concepción, Salto R. Nare, 1750 m, dic 1974 (fl), *P. Ortiz 655* (HPUJ).

30.20. *C. wagneri* Rchb. f., Linnaea 41: 19, 1876. **Distribución:** regiones, CCEN, COCC, SNSM; departamentos, Ant, Ces, Hui, Qui, Ris, 1200-2650 m. Colección testigo: **RISARALDA:** Pereira, vereda la Suiza, SFF Otún-Quimbaya, 1852 m, 23 mar 2004 (fl), *N.H. Ospina 267* (HPUJ).

31. *Ponthieva* R. Br. (Figuras 6-c,d, 7-a,b).

Plantas con flores de tamaño medio, numerosas, esparcidas, largamente pediceladas; ovario filiforme, casi de la misma longitud del pedicelo; sépalos vistosos, oblicuamente ovados a dolabrifomes; pétalos lateralmente unidos con la columna; labelo largamente unguiculado, disco oblongo-linear, carnoso-callosa; antera con filamento bien definido; clinandrio amplio, infundibuliforme, membranoso; rostelo membranoso y alargado, ápice truncado al caer el viscidio; polínios redondeados, unidos al ápice del rostelo por medio de un viscidio redondeado, oscuro, hámulo triangular. **Distribución:** género con alrededor de 30 especies, distribuidas en las regiones tropical y subtropical de América, desde México, en Las Antillas, hasta Bolivia. Para Colombia se registran quince especies, distribuidas en las tres cordilleras y en la Sierra Nevada de Santa Marta, entre 600 y 3200 m de altitud. Se observan principalmente en sitios boscosos muy húmedos, aunque no son raros en sitios intervenidos, dentro de plantaciones y taludes a orilla de carreteras.

31.1. *Ponthieva andicola* Rchb. f., Linnaea 41: 52, 1876. Tipo: Ecuador: CHIMBORAZO, 1857-1859, *Spruce 5998* (HT: W; IT: AMES, B, G, K). Referencia: Citada para Colombia por **Dodson** (1992).

31.2. *P. appendiculata* Schltr., Repert. Spec. Nov. Regni Veg. Beih. 14: 116, 1915. Tipo: Ecuador: PICHINCHA, *Sodiño 141* HT: AMES). **Distribución:** regiones, PERI; departamentos, Ces, 1800-2551 m. Colección testigo: **CESAR:** Agustín Codazzi, Serranía de Perijá, vereda Siete de Agosto, 1884-2551 m, 10 dic 2005 (fl), *O. Rivera 2849* (COL).

31.3. *P. diptera* Lindl. & Rchb. f. (Figura 6-c), Bonplandia 2: 278, 1854. **Distribución:** regiones, CCEN, COCC, CORI, NUPA, SNSM; departamentos, Ant, Boy, Cau, Cun, Mag, Ris, Tol, Nar, Sant, Val, 1300-3000 m. Colección testigo: **BOYACÁ:** Monquirá, vereda Colorado, sector Alto, Río Pómea, 2200-2300 m, 9 jul 2001 (fl), *H. Dueñas 3082* (COL).

31.4. *P. gracilis* Renz, Candollea 11: 266, 1948. **Distribución:** regiones, ORIQ; departamentos, Met, 600 m. Referencia:

Solo se conocen los ejemplares citados por **Renz** (1948) en la descripción original de esta especie: **META:** Villavicencio, Río Guacavía, 600 m, 1 ene 1938, *O. Renz 4097* (RENZ, n.v., Sintypus); Río Negro unterhalb der Hauser Servitá, 600 m, 1 dic 1939, *O. Renz 4153* (RENZ, n.v., Sintypus).

31.5. *P. inaudita* Rchb. f., Linnaea 41: 18, 1876. Tipo: PERÚ. *Warscewicz s.n.* (T?). (*P. microglossa* Schltr.) Referencia: Ampliamente distribuida en la sudamérica tropical. **Distribución:** regiones, CCEN, departamentos, Cau, Tol. Colección testigo: **CAUCA:** Hacienda Sotará, 2300 m, 22 feb 1884, *F.C. Lehmann 3716* (G). **TOLIMA:** La Ceja rio Ullnos, 2500 m, 9 nov 1882, *F.C. Lehmann 2150* (G).

31.6. *P. maculata* Lindl. (Figura 7-a,b),

Ann. Mag. Nat. Hist. 15: 385, 1845. **Distribución:** regiones, CCEN, COCC, CORI, SNSM; departamentos, Ant, Cau, Cun, Mag, Sant, 1900-2700 m. Colección testigo: **CAUCA:** El Tambo, PNN Munchique, alrededores de la cabaña de La Romelía, 2600-2700 m, 12 abr 1994 (fl, fr), *F. González et al. 3136* (COL).

31.7. *P. orchioides* Schltr., Repert. Spec. Nov. Regni Veg. Beih. 15: 50, 1917. Tipo: Ecuador. PICHINCHA, in dumetis, *Mille 27A* (HT: AMES). Referencia: Especie de Ecuador, Colombia y Venezuela, citada para Colombia por **Dodson** (1992).

31.8. *P. parvilabris* Lindl., Orchid. Lindeniana 27, 1846. Tipo: COLOMBIA. 1842-1843, *Linden 1470* (G). **Distribución:** regiones, CCEN, SNSM; departamentos, Boy, Cau, Ces, Tol, 2300-2650 m. Colección testigo: **BOYACÁ:** Cañon del Chicamocha, San Mateo, oct 1991, *A. Etter 903* (COL). **CESAR:** Valledupar, Sierra Nevada de Santa Marta, Hoya del Río Donachuí, Cancurúa, 2400-2650 m, 10 oct 1959 (fl), *J. Cuatrecasas & R. Romero-Castañeda 24716* (COL).

31.9. *P. pulchella* Schltr., Repert. Spec. Nov. Regni Veg. Beih. 15: 196, 1918. Tipo: Guatemala: ad rupes, Sta. Eulalia, Sierra Madre, sep 1876, *Bernoulli & Cario 667*. Citada para Colombia por **Dodson** (1992).

31.10. *P. af. racemosa* (Walter) C. Mohr, Contr. U.S. Nat. Herb. 6: 460 1901. **Distribución:** regiones, COEN, departamentos, Boy. Colección testigo: **BOYACÁ:** Miraflores, 1800 m, 15 oct 1938, *O. Renz 4130* (Hb. RENZ).

31.11. *P. rostrata* Lindl., Ann. Mag. Nat. Hist. 15: 385, 1845. Tipo: Ecuador: PICHINCHA. *Hartweg 1437* (K-L). **Distribución:** regiones, CCEN, COCC, CORI, NUPA, PERI; departamentos, Ant, Boy, Cau, Ces, Cun, Nar, Nsa, Sant, Val, 1250-3200 m. Colección testigo: **CAUCA:** Timbío, Los

Robles, predios de la Fundación Universitaria, 2000 m, 27 mar 1992 (fl), *A. Fernández-P. & D. Troyano 40000* (AFP).

31.12. *P. similis* C. Schweinf. (Figura 6-d), Bot. Mus. Leaf. 9: 226, t. 5, f. 5-7, 1941. (*P. ochreatea* Renz). **Distribución:** regiones, CORI; departamentos, Cun, 2000-3000 m. Colección testigo: **CUNDINAMARCA:** Sesquilé, Zona de la Laguna vieja de Guatavita, 2900-3000 m, 2 jul 2000 (fl), *J.L. Fernández-Alonso & J. Castillo 18916* (COL); El Retiro – La Calera, 2700 m, 18 nov 1938 O. Renz 4137 (Hb. RENZ).

31.13. *P. sylvicola* Rchb. f., Linnaea 41: 52, 1876. Tipo: Ecuador. PICHINCHA: Pichincha. *Jameson s/n* T (T: W). Referencia: Citada para Colombia por **Dodson** (1992).

31.14. *P. venusta* Schltr., Repert. Spec. Nov. Regni Veg. Beih. 9: 57, 1921. Tipo: Perú: CUZCO, Sandia, *Weberbauer 429* (AMES). **Distribución:** regiones, CCEN, NUPA, SNSM; departamentos, Ces, Hui, Nar, 1200-2500 m. Colección testigo: **NARIÑO:** Mallama, La Calera, cercanías de la Nariz del Diablo, 2500 m, 13 abr. 1989 (fl), *B. Ramirez 1294* (PSO).

31.15. *P. villosa* Lindl., Plantas Hartwegianas imprimis Mexicanas 155, 1845. Tipo: Ecuador: EL ORO, 1300 m, 1845, HT: *Hartweg s.n.* (K). **Distribución:** regiones, COCC, CORI; departamentos, Boy, Val, 2070-2200m. Colección testigo: **VALLE DEL CAUCA:** El Cairo, La Amarillas, frontera Valle-Chocó, cordillera W Serranía de los Paraguas, 2070 m, 31 mar 1988 (fl, fr), *P. Silverstone-Sopkin et al. 3830* (CUVC).

32. *Pseudocentrum* Lindl.

Plantas con hojas generalmente tanto basales como caulinares, convirtiéndose paulatinamente en brácteas que disminuyen de tamaño hacia el ápice del escapo. Flores de tamaño medio, con un corto pedicelo, de menor longitud que el ovario; sépalos laterales casi totalmente fusionados formando un largo espolón o una gálea que engloba el resto de verticilos florales; sépalo dorsal libre, recurvado; pétalos unidos lateralmente a la columna; labelo trilobulado, lóbulos laterales unidos y paralelos a la columna, conduplicados, lóbulo apical muy largo, curvado según la forma dada por los sépalos laterales, ápice uncinado; columna relativamente corta y gruesa; rostelo membranoso, alargado, filiforme, con el viscidio terminal; hámulo pequeño, agudo; polinios clavados. **Distribución:** del género *Pseudocentrum* se conocen aproximadamente seis especies distribuidas desde Costa Rica hasta Perú y en las Antillas. En Colombia se presentan seis especies, distribuidas en los departamentos de las tres cordilleras, entre 1750 y 3100 m de altitud, en bosque húmedo y páramo.

32.1. *Pseudocentrum bursarium* Rchb. f., Linnaea 41: 53, 1876. **Distribución:** regiones, CORI, NUPA; departamen-

tos, Met, Nar, Nsa, 1750-3050 m. Colección testigo: **META:** Cubarral, Macizo de Sumapaz, Hoya de la Quebrada El Buque, 2900 m, 12 jul 1981 (fl), *S. Díaz et al. 2843* (COL).

32.2. *P. macrostachyum* Lindl., J. Linn. Soc., Bot. 3: 64, 1858. **Distribución:** regiones, COCC, CORI; departamentos, Cun, Val, 2070-2450 m. Colección testigo: **VALLE DEL CAUCA:** El Cairo, Cerro del Inglés, frontera Valle-Chocó, Serranía de los Paraguas, 2070-2430 m, 01 abr 1988, *P. Silverstone-Sopkin et al. 3894* (fl, fr) (CUVC, MO).

32.3. *P. purdii* Garay, Bot. Mus. Leaf. 26(1): 4, 1978. **Distribución:** regiones, CARI; departamentos, Gra. Referencia: la especie se conoce para Colombia solamente del tipo de La Guajira establecido por **Garay** (1978b): **LA GUAJIRA:** Monte del Agua, Río-hacha, *Purdie s/n* (HT: K, n.v.).

32.4. *P. sylvicola* Rchb. f., Flora 69: 548, 1886. **Distribución:** regiones, CCEN, CORI, NUPA; departamentos, Cau, Cun, Nar, Put, Sant, 2050-3050 m. Colección testigo: **CAUCA:** Coconuco, Valle de paletará, PNN de Puracé, 3050 m, 29 jul 1980 (fl, fr), *G. Lozano 3464* (COL); **PUTUMAYO:** C. Oriental, 3000 m, 20 feb 1881, *F.C. Lehmann 261* (G).

32.5. *Pseudocentrum* sp. 1. **Distribución:** regiones, CORI; departamentos, Ant, Colección testigo: **ANTIOQUIA:** Medellín, 01 nov 2001, *L. R. Sánchez 5698* (fl) (HUA).

32.6. *Pseudocentrum* sp. 2. **Distribución:** regiones, CCEN, CORI; departamentos, Ara, Cun, Qui, 2800-3100 m. Colección testigo: **ARAUCA:** El Tobo, Sierra Nevada del Cocuy, valle de la Quebrada Playón, 3000-3020 m, s/f (fl), *A. M. Cleef 10150* (COL).

33. *Pterichis* Lindl. (Figura 7-c,d).

Plantas con escapo lateral; hojas en roseta o ausentes en floración, lámina lanceolada a elíptica, base decurrente sobre el pecíolo. Flores de tamaño medio, amarillas a marrón o pardo-rojizo; pétalos aglutinados con el sépalo dorsal, descendentes; labelo carnoso, conduplicado, más ancho que largo, triangular, trilobado o deprimidamente ovalado con una cauda apical amplia y larga, recurvada, en la superficie interna papiloso-pubescente, hacia los márgenes laterales con 1-2 hileras de papilas carnosas, oscurecidas; columna corta, gruesa; antera ovada; rostelo erecto, filiforme, al caer el viscidio el ápice truncado; viscidio pequeño, redondeado; polinios oblongo-ovoideos, con caudículas cortas. **Distribución:** el género *Pterichis* está constituido por alrededor de 15 especies nativas de los Andes americanos, con unas pocas especies en Costa Rica y Jamaica. En Colombia están presentes nueve especies, distribuidas a lo largo de las cordilleras,

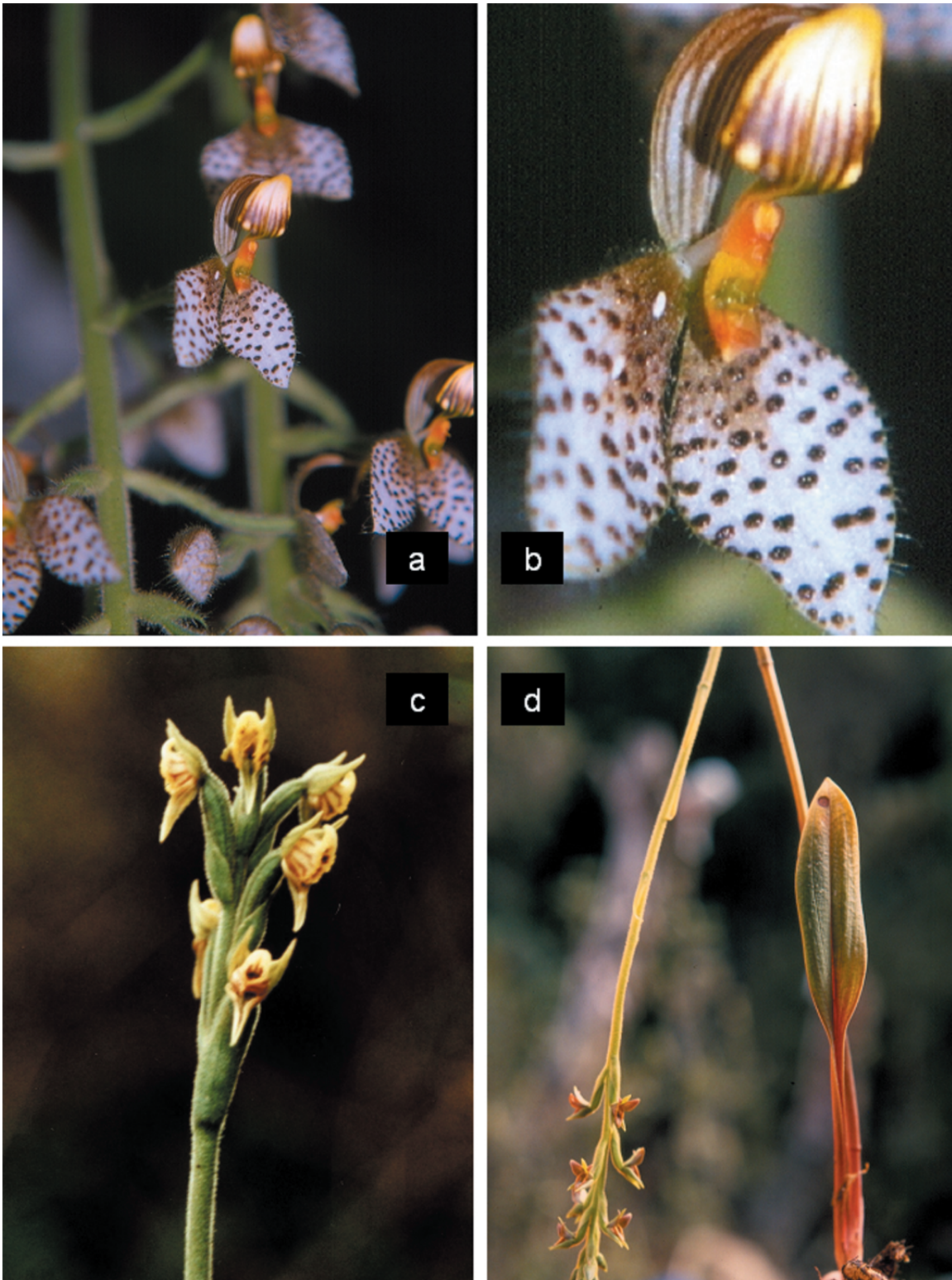


Figura 7. a, b- *Ponthieva maculata* Lindl. Cundinamarca, Bogotá, cultivada (J. L. Fernández-Alonso). c- *Pterichis galeata* Lindl., Boyacá, Chinavita, Cerro Mamapacha (H. Dueñas et al. 3107, COL). d- *P. galeata*, Huila, Gigante, Páramo de Miraflores (J.L. Fernández-Alonso et al. 14867, COL).

en altitudes comprendidas entre 2600 y 4000 m, pocas veces registradas por debajo de 3000 m. Habitan principalmente sectores de páramo y subpáramo, aunque algunas veces es posible observarlas en el interior del bosque andino. **Morales** (1979, 1986) presenta una revisión completa del género *Pterichis* para Colombia.

33.1. *Pterichis colombiana* G. Morales L., Orquideología 16(3): 72, 1986. Tipo: **BOYACÁ**: Duitama, Páramo de La Rusia, Serranía Peña Negra, 1,5 km al N-NE de la Laguna Negra, 3820 m, 18 dic 1972 (fl), *A. M. Cleef 7469* (HT: COL). **Distribución**: regiones, CORI; departamentos, Boy, 3820 m.

33.2. *P. fernandezii* G. Morales L., Orquideología 16(3): 74, 1986. Tipo: **CUNDINAMARCA**: Choachí, Carretera Bogotá-Choachí, 2750 m, 22 sep 1979 (fl), *G. Morales L. & O. Castaño 194* (HT: COL). **Distribución**: regiones, CORI; departamentos, Cun, 2750 m. Colección testigo complementaria: **CUNDINAMARCA**: Choachí, Carretera Bogotá-Choachí, 2750 m, 22 sep 1979, *G. Morales L. & O. Castaño 195* (fl) (COL).

33.3. *P. galeata* Lindl. var. *galeata* (Figura 7-c,d)

Gen. Sp. Orchid. Pl. 445, 1840. **Distribución**: regiones, CCEN, COCC, CORI, NUPA; departamentos, Ant, Boy, Cau, Cun, Hui, Nar, Put, Val, 2600-3625 m. Colección testigo: **HUILA**: Gigante, vereda Ventanas, Páramo de Miraflores, 2970 m, 12-16 ago 1997 (fl), *J.L. Fernández-Alonso et al. 14867* (COL).

33.3.a. *P. galeata* Lindl. var. *quilinsayacoana* G. Morales L., Orquideología 16: 60, 1986. Tipo: **NARIÑO**: Páramo Quilinsayaco, entre La Cocha y Santiago, 2700 m, 1 ago 1961 (fl, fr), *L.A. Garay 375* (AMES) (**Morales**, 1986).

33.4. *P. habenarioides* (F. Lehm. & Kraenzl.) Schltr., Repert. Spec. Nov. Regni Veg. Beih. 7: 214, 1920. Tipo: COLOMBIA: **CAUCA**, *Lehmann 6419* (K). **Distribución**: regiones, CCEN, CORI, NUPA; departamentos, Boy, Cau, Cun, Hui, Met, Nar, Put, Qui, 2970-3600 m. Colección testigo: **BOYACÁ**: Chinavita, Cerro Mamapacha, 3300 m, 26 jul 2001, *H. Dueñas et al. 3107* (fl, fr) (COL).

33.5. *P. multiflora* (Lindl.) Schltr., Bot. Jahrb. Syst. 45: 389, 1911. **Distribución**: regiones, CCEN, CORI; departamentos, Hui, Nsa, 3100-3200 m. Colección testigo: **NORTE DE SANTANDER**: Toledo, Páramo de Tamá, arriba de La Cueva, 3100-3200 m, 27 oct 1941, *J. Cuatrecasas et al. 12632* (fl, fr) (COL).

33.6. *P. parvifolia* (Lindl.) Schltr., Bot. Jahrb. Syst. 45: 389, 1911. **Distribución**: regiones, NUPA; departamentos,

Nar, 3700 m. Colección testigo: **NARIÑO** Mallauna-Piedrancha, 3300-3700 m, 8 ene 2009, L. M. Caballero *et al.* 3(COL); Guachucal / Cumbal, Páramo del Infiernillo, vertiente en dirección al Volcán Cumbal, 3700 m, 5-9 mar 1999, *D. Stancik 2687* (fl) (COL, PSO, PRC).

33.7. *P. pauciflora* Schltr., Repert. Spec. Nov. Regni Veg. Beih. 8: 41, 1921. **Distribución**: regiones, CORI; departamentos, Boy, Cun, Met, 3000-3700 m. Colección testigo: **BOYACÁ**: Arcabuco, SFF Iguaque, camino a la Laguna, 3600 m, 24 sep 2002, *H. Dueñas, F. Cortés y N. Aranguren 3130* (COL). **META**: Cubarral, Macizo de Sumapaz, alrededores de la Laguna El Sorbedero, 3550 m, 04 jul 1981, *S. Díaz et al. 2472* (fl) (COL).

33.8. *P. tomentulosa* Schltr., Repert. Spec. Nov. Regni Veg. Beih. 7: 56, 1920. Referencia: la especie se conoce solo del tipo, procedente de Colombia, establecido por **Schlechter** (1920b).

33.9. *P. triloba* (Lindl.) Schltr., Bot. Jahrb. Syst. 45: 389, 1911. **Distribución**: regiones, CORI; departamentos, Boy, Nsa, 3000-3500 m. Colección testigo: **NORTE DE SANTANDER**: Toledo, vía a Páramo de Santa Isabel, 3000-3080 m, 3 nov 1994 (fl, fr), *J.L. Fernández-Alonso et al. 11850* (COL).

ANEXO (Spiranthoideae Parte I)

Como complemento a lo publicado en la parte I de esta sinopsis de las orquídeas espirantoides de Colombia (**Dueñas & Fernández-Alonso**, 2007): Tribus Goodyereae y Spiranthae –subtribus Prescottiinae y Spiranthinae–, se incluyen aquí nuevos registros de especies para Colombia de los géneros *Aspidogyne* y *Microchilus* (Tribu Goodyereae) y el género *Helonema* (Tribu Spiranthae, subtribu Spiranthinae), que no había sido referido en la primera parte y al que asignamos el número 12A, dentro del presente catálogo, inmediatamente después del número 12 (*Beloglottis* Schltr).

1. *Aspidogyne*

1.8. *Aspidogyne goaltaensis* Ormerod, Harvard Pap. Bot. 13(1): 57, 2008. Tipo: Ecuador: CARCHI, 1230-1250 m, 10 jun 1993, *B. Boyle, A. Butler & E. Lloyd 2158* (HT: MO) (**Ormerod**, 2008). El ejemplar tipo es de un sitio muy cerca de la frontera con Colombia, por lo cual se presume su presencia en el país.

Recientemente, **Ormerod** (2007) propuso la transferencia de *Stephanothelys colombiana* Garay, especie tratada en la primera parte de este estudio (**Dueñas & Fernández-Alonso**, 2007), al género *Aspidogyne* (*A. colombiana* (Garay) Ormerod). Esta sería la novena especie de este género, representada en territorio colombiano.

4. *Microchilus*

4.4a. *Microchilus erythrooides* (Schltr.) Ormerod ssp. *venadosae* Ormerod, Harvard Pap. Bot. 13(1): 72, 2008. Tipo: **ANTIOQUIA**: Urrao, PNN Las Orquídeas, sector Venados arriba, 1090-1215 m, 28 jul 1988 (fl, fr), A. Cogollo *et al.* 3567 (HT: MO, IT: JAUM) **Distribución**: regiones, COCC; departamentos, Ant, 1090-1215 m.

4.33. *M. alzatei* Ormerod, Harvard Pap. Bot. 13(1): 65, 2008. Tipo: **ANTIOQUIA**: Campamento, 800-1300 m, 1 jun 1986 (fl), A. Cogollo & J. Alzate 2265 (HT: MO, IT: HUA, JAUM) (Ormerod, 2008). **Distribución**: regiones, VAIN; departamentos, Ant, 800-1300 m.

4.34. *M. bravocollinus* Ormerod, Harvard Pap. Bot. 13(1): 67, 2008. Tipo: **ANTIOQUIA**: Fredonia, Cerro Bravo, 1770-2050 m, 6 jun 1992 (fl, fr), R. Fonnegra *et al.* 4385 (HT: MO, IT: COL, HUA, NY) (Ormerod, 2008). **Distribución**: regiones, CCEN; departamentos, Ant, 1770-2050 m.

4.35. *M. chicalensis* Ormerod, Harvard Pap. Bot. 13(1): 71, 2008. Tipo: Ecuador: CARCHI, environs of Chical, 12 km below Maldonado on the Río San Juan, 1200 m., 29 May 1978, M.T. Madison *et al.* 4732 (HT: SEL) (Ormerod, 2008). El ejemplar tipo es de un sitio muy cerca de la frontera con Colombia, por lo cual se presume su presencia en el país.

4.36. *M. constrictus* Ormerod, Harvard Pap. Bot. 13(1): 71, 2008. Citado por Ormerod (2008) para Brasil, Colombia y Perú. **Distribución**: regiones, VAIN; departamentos, Val, 300-600 m. Colección testigo: **VALLE**: W Andes of Cali, forest of Las Juntas del Dagua, 300-600 m, jul 1891, F.C. Lehmann 8169 (AMES, K, NY).

4.37. *M. frotinoensis* Ormerod, Harvard Pap. Bot. 13(1): 74-75, 2008. Tipo: **ANTIOQUIA**: Frontino, región de Murri, Alto de Cuevas, 1990 m, 6 nov 1988 (fl), J. L. Zarucchi *et al.* 7216 (HT: MO, IT: COL, HUA) (Ormerod, 2008). **Distribución**: regiones, COCC; departamentos, Ant, 1990 m.

4.38. *M. gentryi* Ormerod, Harvard Pap. Bot. 13(1): 75, 2008. Tipo: **VALLE DEL CAUCA**: Cali, Bosque de San Antonio al W de Cali, 1950-2050 m, 15 jul 1984 (fl, fr), A. Gentry *et al.* 48150 (HT: MO, IT: COL) (Ormerod, 2008). **Distribución**: regiones, COCC; departamentos, Val, 1700-2050 m. Colección testigo: **VALLE DEL CAUCA**: Darién, Río Bravo, NW del Darién, 4700 pies, 26 jul 1962 (fl, fr), D. Ll. Hugh-Jones 117 (COL); Yotoco, 1700 m, 11 nov 1978 (fl), G. Lozano y J. Díaz 3040 (HT: MO, IT: COL, MO).

4.39. *M. giraldo-gensinii* Ormerod, Harvard Pap. Bot. 13(1): 75-77, 2008. Tipo: **VALLE DEL CAUCA**: Cali, Finca Zingara, Km 18 vía Cali - Buenaventura, Km 4 vía Dapa,

Corregimiento de La Elvira, Cordillera Occidental, 1900 m, 18 abr 1994, J. Giraldo-Gensini 277 (HT: MO). Otros ejemplares: **VALLE DEL CAUCA**: Ibídem, 9 may 1994, J. Giraldo-Gensini 330 (MO). Ibídem, 16 jun 1996, J. Giraldo-Gensini & A. Corrales 717 (MO) (Ormerod, 2008). **Distribución**: regiones, COCC; departamentos, Val, 1900 m.

4.40. *M. libanoensis* Ormerod, Harvard Pap. Bot. 13(1): 77-78, 2008. Tipo: **TOLIMA**: Líbano, "La Virginia", 1200-1500 m, 22 dic 1917, F.W. Pennell 3255 (HT: AMES, IT: NY, US) (Ormerod, 2008). **Distribución**: regiones, CCEN; departamentos, Tol, 1200-1500 m.

4.41. *M. longiflorus* Ormerod, Harvard Pap. Bot. 13(1): 77-78, 2008. Tipo: Ecuador: CARCHI: Tulcán, Guapli Chico, 1330 m, 19 ene 1988, W. S. Hoover & al. 2787 (HT: MO) (Ormerod, 2008). Crece en zona limítrofe con el Departamento de Nariño, en Colombia.

4.42. *M. marulandae* Ormerod, Harvard Pap. Bot. 13(1): 80, 2008. Tipo: **ANTIOQUIA**: Jardín, Quebrada Bonita, 1950 m, 11 may 1986 (fl, fr), O. Marulanda 102 (HT: MO, IT: HUA) (Ormerod, 2008). **Distribución**: regiones, COCC; departamentos, Ant, 1950 m.

4.43. *M. microcalcar* Ormerod, Harvard Pap. Bot. 13(1): 80-81, 2008. Tipo: **ANTIOQUIA**: W. of Santo Domingo, La Aldea, 2130 m, 10 may 1985, C. Luer *et al.* 11316 (HT: MO). Otros ejemplares: **ANTIOQUIA**: La Unión, 5 Km al W de Mesopotamia, 2400 m, 8 abr 1988, C. Luer *et al.* 13069 (MO) (Ormerod, 2008). **Distribución**: regiones, CCEN; departamentos, Ant, 2130-2400 m.

4.44. *M. queremalensis* Ormerod, Harvard Pap. Bot. 13(1): 81, 2008. Tipo: **VALLE DEL CAUCA**: Cerca de Queremal, La Victoria Path, al sur de Queremal, 1450-1480 m, 27 jul 1997, T.B. Croat & J.F. Gaskin 80441 (HT: MO) (Ormerod, 2008). **Distribución**: regiones, COCC; departamentos, Val, 1480 m.

4.45. *M. riopalanquensis* Ormerod, Harvard Pap. Bot. 13(1): 81-83, 2008. Tipo: Ecuador: LOS RIOS, Río Palenque Biological Station, 150-220 m, 6 mar 1974, Dodson 5462 (HT: SEL). Según Ormerod (2008), esta especie se encuentra en Colombia, Ecuador y Perú. **Distribución**: regiones, VAIN; departamentos, Tol, 500 m. Colección testigo: **TOLIMA**: Hacienda Peñas Blancas, cerca de Mariquita, 500 m, 9 ene 1949, M. Schneider 482 (S) (Ormerod, 2008).

4.46. *M. valdivianus* Ormerod, Harvard Pap. Bot. 13(1): 83, 2008. Tipo: **ANTIOQUIA**: Valdivia, Alto de Ventanas, 2000 m, 7 ene 1994 (fl), R. Callejas & A. J. Bornstein 11082 (HT: MO, IT: HUA) (Ormerod, 2008). **Distribución**: regiones, CCEN; departamentos, Ant, 2000 m.

4.47. *M. ventosus* Ormerod, Harvard Pap. Bot. 13(1): 84, 2008. Tipo: **ANTIOQUIA**: Campamento, Llanadas, 1650-1810 m, 7 sep 1989 (fl), *R. Callejas et al. 8281* (HT: MO, IT: HUA) (Ormerod, 2008). **Distribución**: regiones, CCEN; departamentos, Ant, 1650-1810 m.

4.48. *M. vilnerae* Ormerod, Harvard Pap. Bot. 13(1): 84, 2008. Tipo: **CAUCA**: Arriba de La Vilnera, cerca de Palmira, 1600-2200 m, 17 jun 1883, F.C. *Lehmann 2925* (HT: BM) (Ormerod, 2008). **Distribución**: regiones, CCEN; departamentos, Cau, 1600-2200 m.

4.49. *M. zingarae* Ormerod, Harvard Pap. Bot. 13(1): 86, 2008. Tipo: **VALLE DEL CAUCA**: Cali, Finca Zingara, Km 18 carretera de Cali a Buenaventura, Km 4 vía Dapa, Corregimiento de La Elvira, Cordillera Occidental, 1900 m, 4 jun 1994, *J. Giraldo-Gensini & L. Olver Agredo 361* (HT: MO) (Ormerod, 2008). **Distribución**: regiones, COCC; departamentos, Val, 1900 m.

En la **Tribu Spiranthae, subtribu Spiranthinae** se registra el siguiente género con una especie para Colombia:

12A. *Helonoma* Garay

Hierbas acaulescentes, rizomatosas, con densos mechones de pelos plateados a lo largo del rizoma. Hojas pequeñas, basales, con peciolo blanquecino. Inflorescencia delgada y corta, con pocas flores, secundas, estrechamente tubulares, labelo unguiculado, uña adnata con los sépalos laterales, formando un nectario, lámina sagitada-pandurada, los lados aglutinados con la columna, ápice carnoso, redondeado, piloso; columna clavada, con pie corto; clinandrio profundo, con márgenes membranosos, aglutinados con el sépalo dorsal; rostelo corto, triangular, obtuso, ausente en especies autógamas. **Distribución**: El género comprende alrededor de cuatro especies, distribuidas en Venezuela, Guayana, Brasil y Perú. Para Colombia se registra una especie, del piedemonte de la Cordillera Oriental.

Garay (1980) propuso el género *Helonoma*, con dos especies (*H. americana* (C. Schweinf. & Garay) Garay y *H. bifida* (Ridley & Cliver) Garay), nativas de Venezuela, caracterizadas por presentar un tubo sepalino al cual está unida la uña del labelo, tépalos bifidos y, en especies autógamas, rostelo muy reducido y polínios linear clavados con viscidio redondeado, pequeño o ausente. **Szlachetko** (1996, 1996a) realizó la revisión de las estructuras reproductivas en este género, llegando a la conclusión que, las características exhibidas por especies autógamas no son razón suficiente para delimitar un género, por lo tanto propuso su inclusión como una sección

dentro de *Beloglottis*. Sin embargo, Salazar consideró a *Helonoma* como un género independiente e incluyó a *Wallnoeferia*, como su sinónimo (Salazar, 2003).

12A.1. *Helonoma peruviana* (Szlach.) Salazar, H. Dueñas & Fern. Alonso **comb. nov.** = *Wallnoeferia peruviana* Szlach., *Fragm. Flor. Geobot.* 39: 517-518, fig.2. 1994. Tipo: Perú: HUANUCO. Prov. Pachitea, región de Pucallpa, 25 abr 1988, *Wallnöfer 15-25488* (Holotipus: W).

Hasta ahora era conocida solo por la colección tipo de la amazonía. El siguiente registro es el primero para Colombia. **Distribución**: regiones, CORI; departamentos, Put, 840 m. Colección testigo: **PUTUMAYO**: Mocoa, El Churumbelo, quebrada Dantayaco, 840 m, 13 jun 2002 (fl), *B. R. Ramírez et al. 15520* (COL, CAUP).

Discusión y conclusiones

Diversidad en las tribus y géneros

Resumiendo los resultados mostrados, tanto en la primera parte (Dueñas & Fernández-Alonso, 2007), como en esta segunda entrega, se puede concluir que forman parte de la flora de Colombia 231 especies de orquídeas terrestres, pertenecientes a la Subfamilia Spiranthoideae. Estas pertenecen a 34 géneros, los cuales se encuentran repartidos dentro de 3 tribus: Goodyereae, Spiranthae y Cranichideae (Clasificación según Szlachetko, 1995, 2000), siendo Spiranthae la tribu más diversa con 102 especies en 23 géneros, seguida por Goodyereae con 74 especies en 6 géneros y Cranichideae con 52 especies en 5 géneros.

A nivel genérico, los más diversos son *Microchilus* (con 49 especies), *Cranichis* (20), *Gomphichis* (17), *Cyclopogon* (15), *Ponthieva* (15) y *Pelexia* (13). Por el contrario, se presentan once géneros representados sólo por una especie, de los cuales, *Beloglottis*, *Brachystele*, *Cybebus*, *Eltroplectris*, *Helonoma*, *Lyroglossa* y *Mesadenella*, están poco representados en los herbarios colombianos, con uno o dos ejemplares en total. Además, de los géneros *Hapalorchis*, *Lankesterella*, *Pteroglossa* y *Sauroglossum* no se encontró ejemplar alguno y su registro se sustenta en las publicaciones previas revisadas. De las 230 especies de orquídeas de la subfamilia Spiranthoideae presentes en Colombia, unas 100 son conocidas en Colombia únicamente por el ejemplar tipo y/o escasos registros publicados en la literatura revisada. Igualmente, es importante resaltar que varias de las especies de esta subfamilia se encuentran categorizadas como amenazadas de extinción y también incluidas en el Apéndice II de CITES (MOBOT, 2008).

Distribución altitudinal y regional

La distribución de este grupo de orquídeas en Colombia es básicamente Andina, encontrándose principalmente entre 1300 y 3400 m de altitud. De acuerdo con los registros conocidos, hay géneros exclusivos de la región tropical (entre 0 y 1000 m de altitud), *Ligeophila*, *Beloglottis*, *Helonoma*, *Brachystele*, *Eltroplectris*, *Mesadenella* y *Sacoila*; de la región subandina (entre 1000 y 2200 m de altitud), *Stephanothelys*, *Cybebus*, *Lankesterella* y *Lyroglossa*; de la región andina (entre 2200 y 3500 m de altitud), *Kreodanthus*, *Altensteinia* y *Pseudocentrum*; mientras *Aa*, *Myrosmodes* y *Pterichis*, se observan solo por encima de 3000 m. Los géneros ampliamente distribuidos son *Microchilus*, *Gomphichis*, *Cyclopogon*, *Pelexia*, *Sarcoglottis*, *Coccineorchis*, *Stenorrhynchos*, *Cranichis* y *Ponthieva*, encontrados casi desde el nivel del mar hasta más de 3000 m, en todas las regiones del país (Figura 8).

Nuevos registros para Colombia

En esta segunda parte, se incluyen 2 nuevos registros de géneros para Colombia, cada uno con una especie: *Helonoma* (*H. peruviana*), *Lyroglossa* (*L. grisebachii*) y se añaden 32 nuevos registros a la lista conocida de

especies colombianas, pertenecientes a 9 géneros: *Aspidogyne* (*A. goaltensis*), *Coccineorchis* (*C. cristata*, *C. navarrensis*), *Cranichis* (*C. calva*), *Cyclopogon* (*C. maldonadoanus*, *C. olivaceous*, *C. rimbachii*), *Microchilus* (*M. alzatei*, *M. bravocollinus*, *M. chicalensis*, *M. constrictus*, *M. erythrodooides ssp venadosae*, *M. frontinoensis*, *M. gentryi*, *M. giraldo-gensinii*, *M. libanoensis*, *M. marulandae*, *M. microcalcar*, *M. queremalensis*, *M. riopalanquensis*, *M. valdivianus*, *M. ventosus*, *M. vilnerae* y *M. zingarae*), *Pelexia* (*P. hirta*, *P. palmorchidis*), *Ponthieva* (*P. venusta*), *Pseudocentrum* (*P. cleefii*) y *Sarcoglottis* (*S. grandiflora*, *S. maasorum*, *S. neglecta*, *S. stergiosii*). En algunos casos se trata de especies previamente conocidas solo de los países vecinos y en otros de taxones recientemente descritos.

Agradecimientos

Al Instituto de Ciencias Naturales y el Departamento de Biología de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá; a los Curadores, Edgar Linares, Luis Carlos Jiménez (COL), Dairon Cárdenas (COAH), Ramiro Fonnegra (HUA), Álvaro Cogollo (JAUM), Darío Sánchez (MEDEL), Yaneth Muñoz (FMB), María Eugenia Morales (UPTC) y Marcela

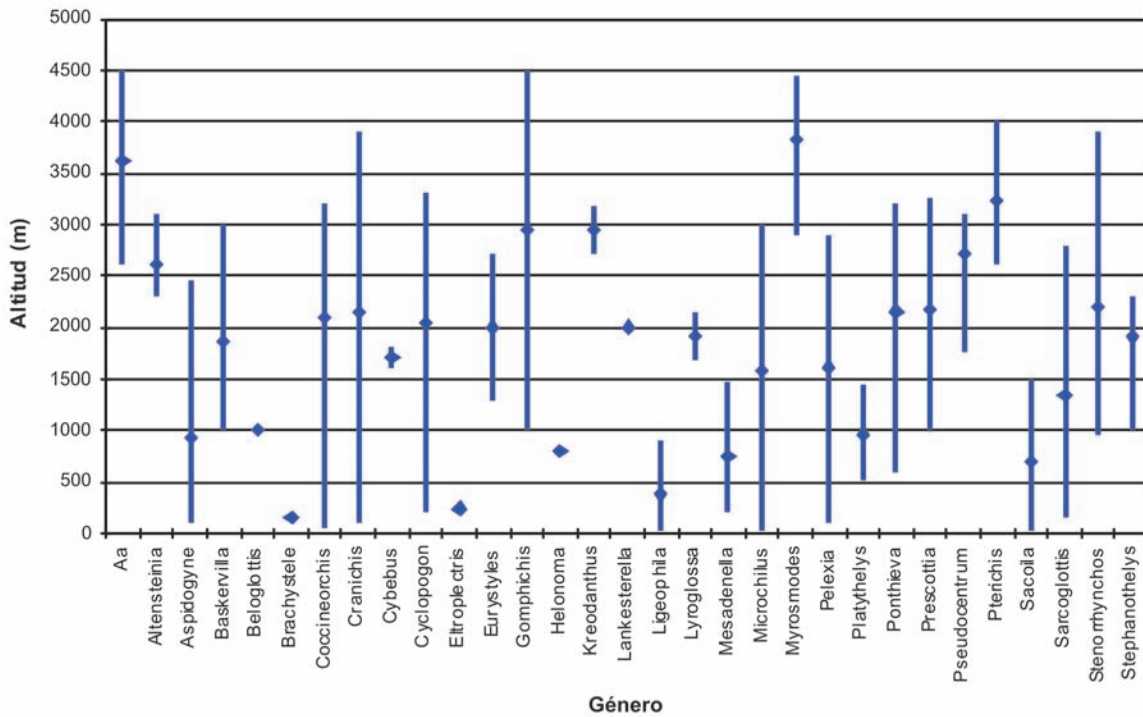


Figura 8. Distribución altitudinal de géneros de Spiranthoideae en Colombia

Alvear (HPUJ) por su colaboración durante las visitas a los respectivos herbarios; a los Curadores, Bernardo Ramírez (CAUP), Fabio García (CHOCO), Philip Silverstone-Sopkin (CUVC), L. Miguel Álvarez (FAUC), M. Cristina Vélez (HUQ), Ayda L. Patiño (PSO), Fanny Llanos (SURCO), Héctor Eduardo Esquivel (TOLI) quienes enviaron ejemplares en préstamo para su estudio a José D. Salvador Vega, que ilustró la especie *cybebus grandis*; a Beatriz Salgado de la Universidad del Cauca, Popayán; a Julián Farfán, Elsy C. Buítrago de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja; a Carlos Bernal, Gonzalo Peñalosa y Janice Valencia de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, por su colaboración con material fresco recolectado en diferentes zonas del país; a Carlos Aedo del Jardín Botánico de Madrid, Rodrigo Singer de la Universidade Estadual de Campinas, Daniel Stancik de Praga por su colaboración con el envío de literatura; a Francisco Cortés y Nelson Aranguren de la Escuela de Biología, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, por su acompañamiento en las salidas de campo y toma de fotografías. A Adriana Rocío Castillo y a Alfonso Fernández, por su participación en varias jornadas de recolección. A Gerardo Salazar, del Herbario Nacional de México (MEXU), por ayuda con algunas determinaciones y sus valiosas observaciones al manuscrito.

Bibliografía

- Álvarez-Molina, A. & K. M. Cameron. 2009. Molecular phylogenetics of Prescottiinae s.l. and their close allies (Orchidaceae, Cranichideae) inferred from plastid and nuclear ribosomal DNA sequences. *Amer. J. Bot.* **96**: 1020-1040.
- Carnevali, G. & I. Ramírez de C. 1993. New or Noteworthy Orchids for the Venezuelan Flora IX: New Taxa, New Records, and Nomenclatural changes, Mainly from Guayana Shield and Northern Amazonas. *Novon* **3**: 102-125.
- De Wilde, A. 1994. Inventario y observaciones sobre la ecología de las Orchidaceae en el Parque Regional Natural Ucumarí. En: Rangel, O. (Ed.). Ucumarí, un caso típico de la diversidad biótica andina. CARDER, Pereira.
- Dodson, C. H. 1992 Checklist of the Orchids of the Western Hemisphere. Draft manuscript deposited in Missouri Botanical Garden Library.
- . 1993. Orquídeas Ecuatorianas, Nuevas especies y combinaciones. *Orquideología* **19**(1): 77-99.
- Dressler, R. L. 1993. Phylogeny and classification of the Orchid Family. Cambridge University Press.
- Dueñas G., H. y J.L. Fernández-Alonso. 2007. Sinopsis de la Subfamilia Spiranthoideae (Orchidaceae) en Colombia, Parte I. *Rev. Acad. Col. Ci. Ex. Fís. Nat.* **31**(118): 5-27.
- Dunsterville, G. C. K. & L. A. Garay. 1959. Venezuelan Orchids Illustrated. Andre Deutsch Vol. I.
- . 1979. Orchids of Venezuela. An Illustrated Field Guide. Botanical Museum of Harvard University.
- Fernández-Pérez, A. & C. Schweinfurth. 1963. Flora de la Real Expedición Botánica del Nuevo Reyno de Granada. Tomo 7. Microspermae, Orchidaceae I. Ediciones Cultura Hispánica, Madrid.
- Figuroa, C., G.A. Salazar, H. A. Zavaleta & M. Engleman. 2008. Root Character evolution and Systematics in Cranichidinae, Prescottiinae and Spiranthinae (Orchidaceae, Cranichideae). *Ann. Bot.* **101**(4): 509-520.
- Garay, L. A. 1962. Studies in American Orchids V. *Caldasia* **8**(40): 517-520.
- . 1978a. Orchidaceae (Cypripedioideae, Orchidoideae, Neottioideae). In: Flora of Ecuador **9**: 1-305
- . 1978b. Studies in American Orchids X. *Bot. Mus. Leaflet* **26**(1): 1-38
- . 1980. A generic revision of the Spiranthinae. *Bot. Mus. Leaflet. Harvard Univ.* **28** (4): 278-425.
- Gorniak, M., J. Mytnik-Ejmont, P. Rutkowski, P. Tukallio, J. Minasiewick & D.L. Szlachetko. 2006. Phylogenetic relationships Within the subtribe Spiranthinae s.l. (Orchidaceae) inferred from the nuclear ITS region. *Biodiv. Res. Conserv.* **1**: 18-24.
- Hoehne, F. C. 1945. Orchidaceas. En: Flora Brasílica **12**(2): 1-389.
- Holmgren, P. K., and N. H. Holmgren. 1998 [continuously updated]. Index Herbariorum: A global directory of public herbaria and associated staff. New York Botanical Garden's Virtual Herbarium. <http://sweetgum.nybg.org/ih/>
- Lindley, J. 1830-1840. The Genera and Species of Orchidaceae plants. Ridways, Piccadilly. London.
- MOBOT. 2008. Link: <http://www.tropicos.org/name/23510215>.
- Morales, L. G. 1979. Revisión de las especies Colombianas del Género *Pterichis*, Orchidaceae. Tesis de grado. Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- . 1986. El género *Pterichis* en Colombia. *Orquideología* **16**(3): 53-79.
- Mytnik, J. P. Rutkowski & D. L. Szlachetko. 2004. New taxa in Mesoamerican Cyclopogoninae (Orchidaceae, Spirantheae). *Ann. Bot. Fennici* **41**: 373-380.
- Ortiz V., P. 1995. Orquídeas de Colombia. Segunda Edición revisada y aumentada. Corporación Capitalina de Orquideología. Santafé de Bogotá.
- . 2000. Lista de especies de orquídeas registradas para Colombia, Adiciones y correcciones. *Orquideología* **21**(3): 341-351.
- Pridgeon, A.L., P.J. Cribb, M.W. Chase & F.N. Rasmussen. 2003. Genera Orchidacearum III: Orchidoideae (Part 2), Vanilloideae. Oxford University Press, New York. 400 págs.
- Renz, J. 1948. Beiträge zur Kenntnis der süd- und zentralamerikanischen Orchideen. I. Orchidaceae-Cranichidinae. *Candollea* **11**: 243-276.

- Rutkowski, P., J. Mytnik & D. L. Szlachetko.** 2004a. New Taxa and new combinations in Mesoamerican Spiranthinae (Orchidaceae, Spiranthae). *Ann. Bot. Fennici* **41**: 471-477.
- . 2004b. New Taxa and new combinations in Mesoamerican Stenorrhynchidinae (Orchidaceae, Spiranthae). *Ann. Bot. Fennici* **41**: 479-489.
- Salazar, G. A.** 2002. Galeottiellinae, a new subtribe and other nomenclatural changes in Spiranthinae (Orchidaceae: Cranichideae). *Lindleyana* **17**(3): 172-176.
- . 2003. Subtribu Spiranthinae. Pp 164-278. In: Pridgeon, A., P.J. Cribb, M. Chase & F. N. Rasmussen (Eds.). *Genera Orchidacearum, Volume 3, Orchidoideae (Part 2)*. Oxford University Press.
- , **M.W. Chase, M.I. Soto Arenas & M. Ingrouille.** 2003. Phylogenetics of Cranichideae with emphasis on Spiranthinae (Orchidaceae, Orchidoideae): evidence from plastid and nuclear DNA sequences *Amer. J. Bot.* **90**(5): 777-795.
- , **G. A., L.I. Cabrera, S. Madriñan & M. Chase.** En prensa. Phylogenetic relationships of Cranichidinae and Prescottiinae (Orchidaceae, Cranichideae) inferred from plastid and nuclear DNA sequences. *Ann. Bot.*
- Schlechter, R.** 1920a. Versuch einer Systematischen Neuordnung der Spiranthinae. *Beih. Bot. Centralbl.* **37**: 317-454.
- . 1920b. Die Orchideenfloren der Sudamerikanischen Kordillerenstaaten, II. Colombia. *Fedde Repert.* **7**: 1-301
- Schneider, M.** 1953. El Género *Cranichis* (Orchidaceae) en Colombia. *Caldasia* **6** (27): 11-18.
- . 1960. Contribución al conocimiento de las orquídeas colombianas: Cranichidinae – Tercera parte. *Caldasia* **8**(39): 401-424.
- Szlachetko, D. L.** 1994a. Genera and species of the subtribe Spiranthinae (Orchidaceae). 10. *Lyroglossa*. *Fragm. Flor. Geobot.* **39**(1): 121-127.
- . 1994b. Studies on Spiranthinae (Orchidaceae). I. *Miscellanea. Fragm. Flor. Geobot.* **39**(2): 417-438.
- . 1995. *Systema Orchidacearum*. *Fragm. Flor. Geobot. Supplementum* 3. W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences. Kraków.
- . 1996. Studies on Spiranthinae (Orchidaceae): I. *Varia. Fragm. Flor. Geobot.* **41**(2): 845-863.
- . 1996a. Notes on *Helonoma* (Orchidaceae, Spiranthinae), with description of a new species from Venezuela. *Fragm. Flor. Geobot.* **41**(2): 701-705.
- . 2000. *Gynostemium* Orchidaceae I. *Apostasiaceae, Cyrtopodiaceae, Orchidaceae (Thelymitroideae, Orchidoideae, Tropidoideae, Spiranthoideae, Neottioideae, Vanilloideae)*. *Acta Botanica Fennica* **169**: 1-380.
- & **R. G. Tamayo.** 1996. *Ochyrella* (Orchidaceae, Stenorrhynchidinae), a new genus from South America. *Fragm. Flor. Geobot.* **41**(2): 697-700.

Recibido: septiembre 16 de 2008.

Aceptado para su publicación: abril 20 de 2009.

POTENCIAL ANTIOXIDANTE DE HOJAS Y CORTEZA DE *BAUHINIA KALBREYERI* HARMS: CONTRIBUCIÓN DE SUS FLAVONOIDES EN ESTA ACTIVIDAD

Por

Heidy F. Ortiz¹, Wilmer F. Sánchez¹, John Méndez A.² & Elizabeth Murillo P.^{2*}

Resumen

Ortiz H. F., W. F. Sánchez, J. Méndez A. & E. Murillo P.: Potencial antioxidante de hojas y corteza de *Bauhinia kalbreyeri* Harms: Contribución de sus flavonoides en esta actividad. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **33**(127): 183-191, 2009. ISSN 0370-3908.

En este estudio se examinó la capacidad antioxidante y antinitrosativa de los extractos y flavonoides aislados a partir de hojas y corteza de *Bauhinia kalbreyeri* Harms (Casco de Vaca. Fabaceae). Los extractos mostraron alta funcionalidad antioxidante y antinitrosativa, en tanto que los flavonoides aislados dejaron ver habilidad para quelar metales e inhibir el NO. Se encontraron diferencias significativas entre los extractos entre sí, y entre ellos y las fracciones de flavonoides ($p < 0.05$). La actividad antioxidante de la planta parece fundamentarse en el conjunto de derivados fenólicos. Los resultados obtenidos indican que el potencial antioxidante de *B. kalbreyeri* es comparable con el del Hidroxitolueno butilado y el ácido ascórbico utilizados como antioxidantes por la industria alimentaria y farmacéutica.

Palabras clave. *Bauhinia kalbreyeri*, radicales libres, flavonoides, potencial antioxidante.

Abstract

In this study the antioxidant and antitrosative capacity of the extracts and isolated flavonoids from the leaves and bark of *Bauhinia kalbreyeri* Harms (Cow Hoof. Fabaceae) was examined. The extracts showed high antioxidant and antinitrosative functionality, while the flavonoids ability to capture metals and inhibit the NO. Significant differences were found among the extracts, and into those and the flavonoids fractions ($p < 0.05$). The antioxidant activity of the plant seems to be based in the whole phenolic derivatives. The results obtained indicate that the antioxidant potential of *B. kalbreyeri* is comparable with the Butylated Hydroxytoluene and the ascorbic acid used as antioxidants by the food and pharmaceutical industry.

Key words. *Bauhinia kalbreyeri*, free radicals, flavonoids, antioxidant potential.

¹ Licenciatura en Ciencias Naturales. Facultad de Ciencias de la Educación. Universidad del Tolima.

² Departamento de Química. Universidad del Tolima.

* Grupo GIPRONUT. Departamento de Química. Facultad de Ciencias. Universidad del Tolima. Ibagué. Tolima. Correo electrónico: emurillo8@hotmail.com/ elizam60@yahoo.com

1. Introducción

En países como Colombia, poseedores de una alta biodiversidad, resulta especialmente importante el estudio de partes de un vegetal, de extractos o de sustancias puras aisladas que presentan significativa actividad terapéutica. En esta búsqueda nos hemos centrado en el estudio de algunas especies vegetales del género *Bauhinia* (Fabaceae-Caesalpinioideae), el cual comprende alrededor de 400 especies (da Silva & Cechinel Filho, 2002), distribuidas en un amplio rango de zonas tropicales a nivel mundial como Asia, África, América central y del sur (Duarte-Almeida, 2004); popularmente son conocidas como pata de vaca, casco de vaca, pie de buey o mororó (Matos, 1998); muchas de ellas son utilizadas en la etnofarmacología en casos de disentería, diarrea, inflamaciones, envenenamiento por animales, infecciones de la piel, como laxativas, carminativas, astringentes, tónico, o en afecciones del hígado (Ali, et al., 1999; Viana, et al., 1999, Raj Kapoor, et al., 2003; Reddy, et al., 2003).

El género *Bauhinia* ha merecido la atención de un número considerable de investigadores que buscan correlacionar la acción antidiabética de estos vegetales con sus constituyentes químicos, especialmente los fitofenoles; no obstante los resultados son algunas veces contradictorios, tal es el caso de Russo y colaboradores (1990), Silva, (1999), Soares, et al. (2000), da Silva, et al. (2002), Damasceno y colaboradores (2004), Gupta (2005), Murillo y colaboradores (2006), entre otros.

Bauhinia kalbreyeri Harms, es quizá una de las especies menos conocida dentro del género que nos ocupa; sin embargo, en Ibagué-Tolima (1170 m.s.n.m., 22.5°C) es encontrada en parques, avenidas y jardines. La etnobotánica de la región utiliza las decocciones de hojas y corteza en el tratamiento de la diabetes mellitus, la cual debe entenderse como un conjunto de patologías originadas fundamentalmente cuando las células beta (en los islotes de Langerhans del páncreas) no producen insulina (Diabetes Mellitus Insulinodependiente) o tipo I; en tanto que si los receptores de insulina de las células del cuerpo no funcionan, se genera la Diabetes Mellitus No Insulinodependiente o tipo II. En cualquier caso, la glucosa no puede ingresar a las células para ser usada efectivamente; el aumento del metabolismo de la glucosa remanente genera entonces un desbalance entre la producción de especies reactivas de oxígeno y la capacidad de defensa antioxidante del cuerpo; desbalance conocido como estrés oxidativo (Halliwell, et al., 1992). Esto ocasiona, a su vez, degeneración de las paredes celulares y de los vasos sanguíneos, daños en la retina, deterioro renal, aterosclerosis, afecciones en el sistema nervioso central e incluso múltiples alteraciones

reproductivas, genotoxicidad, diabetes y cáncer (Gülçin, et al., 2003; Saha, et al., 2004).

En nuestros laboratorios estamos realizando estudios con extractos de algunas especies de *Bauhinia*, entre ellas *B. kalbreyeri*, con el propósito de establecer el potencial antioxidante y la contribución de los constituyentes fenólicos, entre otros los flavonoides, en la actividad funcional revelada por la planta; en el intento por correlacionar la aplicación etnofarmacológica que el vegetal tiene en el departamento del Tolima y los resultados obtenidos en esta investigación.

2. Materiales y Métodos

2.1 Reactivos químicos

El 1,1-Diphenyl-2-picryl hydrazyl (DPPH), el N-[1-Naftil] etilendiamina dihidrocloruro y la Rutina fueron adquiridos de Sigma Chemical Co. Todos los demás reactivos utilizados en el trabajo, incluidos los solventes, fueron de alto grado de pureza de Merck.

2.2 Obtención de los extractos y preparación de la muestra

Se recolectaron hojas y corteza de *B. kalbreyeri*, en óptimo estado de desarrollo vegetativo y fitosanitario, en la zona suburbana de Ibagué (1170 m.s.n.m., 22.5 ± 1°C). Una muestra del espécimen se encuentra en la colección de fabaceas del Herbario Nacional de Colombia de la Universidad Nacional de Colombia con número de referencia (N° COL: 509144). Un proceso de maceración con etanol y agua (1:10, vegetal/solvente, 48 h), con remoción del solvente cada 24h hasta el agotamiento, permitió preparar los extractos crudos, los cuales se filtraron y concentraron a presión reducida en un rotavapor BÜCHI R114, hasta obtener un material viscoso que se almacenó (4°C) en frascos ámbar debidamente rotulados hasta su utilización. En el intento de dar validez científica a las costumbres populares del Tolima, se preparó una decocción con agua a partir del material vegetal (1:10 vegetal/solvente, 30 min), el cual se sometió a los mismos procesos de concentración, envasado y almacenamiento de los anteriores extractos.

2.3 Separación de los flavonoides totales de las hojas y corteza de *Bauhinia kalbreyeri*

La separación de los flavonoides se realizó mediante cromatografía de capa delgada preparativa utilizando como fase estacionaria placas de sílica gel (1 mm de espesor) y como eluyente acetato de etilo-ácido fórmico-ácido acético-agua (100:11:2:7). El desarrollo del cromatograma se efectuó mediante sistema ascendente. Como revelador se aplicó luz UV (365 nm). Las bandas con fluorescencia azul inten-

sa y amarilla se identificaron como flavonoides, las fracciones separadas se sometieron a las mismas pruebas de actividad antioxidante aplicadas a los extractos.

2.4 Determinación del Contenido de Fenoles y Flavonoides

Una alícuota de 0.5 mL de una solución de los extractos (1:50) se mezcló con el reactivo de Folin-Ciocalteu (2.5 mL) y con carbonato de sodio (2 mL, 7.5%); la mezcla se calentó (10 min, 50°C), se le dejó alcanzar la temperatura ambiente y se leyó la absorbancia contra un blanco de reactivos a 760 nm (Singleton & Rossi, 2006). El ácido gálico se utilizó para preparar la curva de calibración, el contenido fenólico total se calculó a partir de la ecuación de regresión: $y = 173.5X$, $r^2 = 0.9977$, y se expresó como miligramos equivalentes de ácido gálico por gramo de material vegetal seco (mgEAG/g).

La cantidad de flavonoides se estimó mezclando una alícuota (0.5 mL) de los extractos crudos y de los estándares con 4 mL de agua destilada, a la solución obtenida se le agregó nitrito de sodio (0.3 mL, 5%), se dejó incubar 5 min, se adicionó tricloruro de aluminio (0.3 mL, 10%) y se dejó en reposo a temperatura ambiente (6 min), después de lo cual se agregó hidróxido de sodio (2 mL, 1M), se aforó con agua destilada a 10 mL, y se leyó la absorbancia a 510 nm (Kumaran, *et al.*, 2007). Las lecturas de esta variable se interpolaron en la curva de calibración preparada con rutina, caracterizada mediante la ecuación de regresión: $y = 805.9X$, $r^2 = 0.9979$. Los resultados se expresaron como miligramos equivalentes de rutina por gramos de material vegetal seco (mgER/g).

2.5 Actividad antioxidante

2.5.1 Actividad estabilizante del radical DPPH

Se cuantificó la capacidad de los extractos y de los flavonoides aislados para estabilizar el radical (DPPH), siguiendo la metodología propuesta por Ohinishi, *et al.* (2005). A 1 mL de cada uno de los extractos (160 µg/mL) se adicionó 3 mL de DPPH (0.1 mM), se incubó a temperatura ambiente (30 min) y se midió la absorbancia a 517 nm. Se utilizaron como patrones el ácido gálico (AG), ácido ascórbico (AA) e hidroxitolueno butilado (BHT), a igual concentración (10 mg/mL).

El porcentaje de Actividad Estabilizante de Radicales Libres (%AERL) se obtuvo mediante la ecuación:

$$\%ASRL = \left[\frac{ABS_{DPPH} - ABS_{MUESTRA}}{ABS_{DPPH}} \right] \times 100$$

2.5.2 Medida del Poder reductor

El poder reductor del vegetal se determinó siguiendo la metodología descrita por Oyaizu (1986), una alícuota de 0.1 mL del extracto crudo se llevó con metanol hasta 1 mL, se mezcló con buffer fosfato (2.5 mL, 0.2M, pH 6.6) y ferricianuro de potasio (2.5 mL, 1%), se incubó a temperatura constante (50°C, 20 min), se adicionó ácido tricloroacético (2.5 mL, 10%), la mezcla resultante se centrifugó (548 x g, 10 min); se tomó una alícuota del sobrenadante (2.5 mL) la cual fue disuelta en una cantidad igual de agua destilada, inmediatamente se agregó cloruro férrico (0.5 mL, 0.1%); finalmente se midió la absorbancia a una longitud de onda de 700 nm. Se utilizaron como controles positivos AG, AA, a igual concentración (15 µg/mL). El poder reductor de los extractos guarda una relación directa con el valor de la absorbancia.

2.5.3 Actividad quelante del ion Fe^{+2}

A los extractos vegetales y a los flavonoides aislados (1%), se les agregó sulfato ferroso (50 µl, 2 mM). La reacción se inició por adición de ferrocina (0.8 mL, 5 mM), la mezcla se agitó fuertemente, dejándola en reposo a temperatura ambiente (10 min), posteriormente se realizó la lectura de absorbancia a una longitud de onda de 562 nm. El mismo procedimiento fue aplicado a los patrones utilizados (EDTA 10, 15%, AG 10%). La densidad óptica es directamente proporcional a la habilidad quelante del extracto. La metodología seguida fue la propuesta por Dinis, *et al.* (1994).

El porcentaje de inhibición de la formación del complejo Ferrocina- Fe^{+2} fue estimada mediante la ecuación:

$$\%AQH = \left[\frac{(A_0 - A_M)}{A_0} \right] \times 100$$

Donde.

%AQH: actividad quelante de Fe^{+2}

A_0 : absorbancia del control

A_M : absorbancia de la mezcla reaccionante

2.5.4 Habilidad para descomponer el H_2O_2

La potencialidad de los extractos y de las fracciones de flavonoides para descomponer el prooxidante peróxido de hidrógeno fue determinada de acuerdo al método sugerido por Ruch, *et al.* (1989). Una solución de H_2O_2 preparada en buffer fosfato (pH 7.4) se le determinó la concentración inicial a 230 nm, utilizando una absortividad molar de 81 $cm^{-1} \cdot mol^{-1} L$. A las muestras (3 mL, 1 ppm) se les adicionó

1.8 mL de la solución tamponada de peróxido. La absorbancia del H₂O₂ remanente se determinó después de 10 min contra un blanco de reactivos.

La actividad inhibitoria del peróxido fue estimada utilizando la siguiente ecuación:

$$\% CDP = \left[\frac{A_M}{A_o} \right] \times 100$$

Donde:

%CDP: actividad inhibitoria de H₂O₂

A₀: Absorbancia del control

A_M: Absorbancia de la mezcla reaccionante

2.5.5 Actividad antinitrosativa

Para establecer la habilidad de los extractos para capturar el óxido nítrico (NO), se aplicó la metodología seguida por **Giraldo et al.**, (2003) con algunas modificaciones. Se prepararon dos baterías de siete tubos cada una. La batería I contenía diferentes volúmenes de los extractos (0.2, 1.2 y 2 mL) a igual concentración (5%), al séptimo tubo se le añadió 1 mL de AG al 5% (patrón); a cada tubo se le agregó suficiente agua destilada para completar 2 mL, inmediatamente se adicionó nitroprusiato de sodio (NPS, 0.4 mL, 113 mM), se agitó y se dejó incubar a temperatura ambiente (150 min), tiempo después del cual se agregó el reactivo de Griess: primero 0.8 mL del reactivo A (ácido sulfanílico al 1% en ácido fosfórico al 5%) y 30 min después se adicionó 0.8 mL del reactivo B (N-1 naftiletilediamina al 0.1% en agua destilada); los tubos se dejaron en reposo 45 min, y se midió la absorbancia a 546 nm. Las lecturas de absorbancia decrecen con el aumento de la actividad antinitrosativa.

La batería II, fue utilizada como blanco de la anterior, para prepararla se siguió el mismo procedimiento descrito anteriormente, reemplazando el volumen de NPS por agua destilada.

La actividad antinitrosativa se estimó de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\% PION = \left[\frac{A_0 - A_M}{A_0} \right] \times 100$$

Donde:

% PION: corresponde al potencial inhibitorio del óxido nítrico

A₀: es la absorbancia del control

A_M: es la absorbancia de la mezcla reaccionante

2.5.6 Análisis estadístico

Todos los datos son expresados como la media de tres determinaciones (n = 3) ± DS. El análisis de regresión lineal se efectuó para calcular la relación dosis-respuesta de las soluciones estándares y muestras analizadas. El grado de correlación entre las variables se expresó a través del coeficiente de correlación r_{xy}. Con el ánimo de medir el nivel de significancia entre los extractos se aplicó un ANOVA de un factor y ANOVA de dos factores. Adicionalmente se realizaron test de comparación múltiple: LSD (diferencia mínima significativa), utilizando el programa de apoyo para estadística general con algunas aplicaciones matemáticas (ESM). Versión 8.4.5. Adicionalmente, se aplicó el test de TUKEY (prueba de comparación múltiple) a través del programa G-STAT (Glaxo-Smithkline. Versión 1.2).

3. Resultados y discusión

Del extracto etanólico de hojas y corteza pulverizadas de *Bauhinia kalbreyeri* se aislaron, mediante cromatografía de capa delgada preparativa, las bandas fluorescentes azules y amarillas con Rf entre 0.3 y 0.8, las cuales respondieron a las pruebas de Shinoda, Pew y cloruro férrico. Un tratamiento posterior con reactivos de desplazamiento (metanol, acetato de sodio, ácido bórico, tricloruro de aluminio y tricloruro de aluminio más ácido clorhídrico) dejó ver una mezcla heterogénea de flavonoides, dentro de los cuales priman las flavonas y los flavonoles, con los OH⁻ ubicados en las posiciones 3 y 5 posiblemente glicosiladas.

La naturaleza química de los flavonoides es predictiva de su actividad estabilizante de radicales libres, debido a que los potenciales reductores de sus radicales son más bajos que aquellos de los radicales peroxilos y superóxido, lo que significa que estos metabolitos secundarios pueden inactivar esas especies prooxidantes y prevenir así sus efectos dañinos (**Rice-Evans et al.**, 1996).

Adicionalmente se realizó un tamizaje fitoquímico al extracto etanólico crudo de hoja y corteza de la *B. kalbreyeri*, encontrándose en ambos abundante contenido de carbohidratos reductores, fenoles, flavonoides, taninos condensados, fenilpropanoides, quinonas, terpenos y/ o esteroides e iridoides. En menor proporción se observaron saponinas y cumarinas. No se detectaron, bajo las condiciones del ensayo, alcaloides, cardiotónicos y lactonas terpénicas. Lo anterior permite inferir que en *B. kalbreyeri* los constituyentes de naturaleza fenólica son abundantes y diversos.

Los fitofenoles, entre ellos los flavonoides, fenilpropanoides y taninos, han sido reportados como poseedores

de múltiples actividades biológicas entre las que se cuenta su acción antioxidante (Rice-Evans *et al.*, 1996; Pietta 2000; Gorinstein *et al.*, 2004; Soobrattee *et al.*, 2005; Dasgupta & De, 2007), teniendo en cuenta además que esta funcionalidad ha sido correlacionada con procesos fisiopatológicos como la diabetes (Gülçin *et al.*, 2003; Saha *et al.*, 2004), en este trabajo se cuantificaron los contenidos de fenoles y de flavonoides totales (figuras 1 y 2 respectivamente).

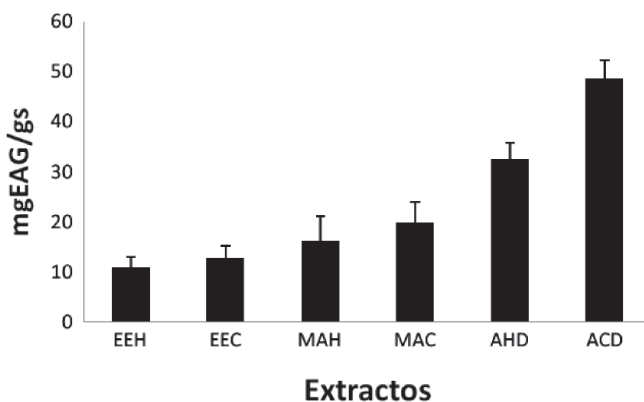


Figura 1. Contenido total de fenoles en *Bauhinia kalbreyeri*

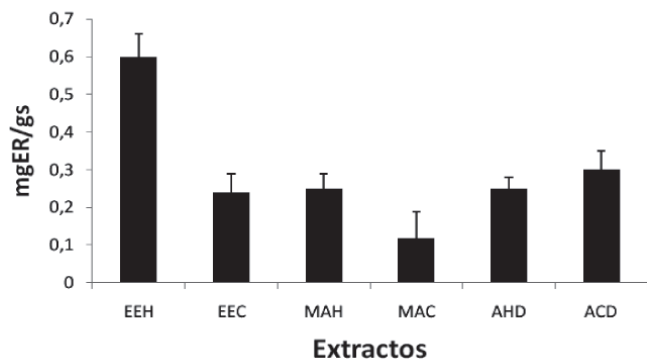


Figura 2. Contenido total de flavonoides en *Bauhinia kalbreyeri*

A través de los resultados que ilustran las figuras 1 y 2 se puede deducir que al someter la corteza de *B. kalbreyeri* a decocción se obtiene una considerable cantidad de constituyentes fenólicos, en tanto que los macerados etanólicos de hojas hacen lo propio en relación con los flavonoides. Al realizar un análisis comparativo se infiere que la utilización de agua caliente favorece la extracción de los compuestos de naturaleza fenólica más que hacer uso del mismo solvente en frío, lo que permite pensar que un producto fitoterapéutico preparado a partir de la planta podría conservar las cualidades

manifestadas en el vegetal crudo. Uno de los mecanismos de acción antioxidante de los constituyentes fenólicos es eliminar radicales libres convirtiéndolos en especies estables, en algunos casos reaccionar con ellos, o bien quelar metales que actúan como cofactores de enzimas que intervienen en procesos oxidativos (Shahidi & Wanasundara, 1992; Sánchez-Moreno *et al.*, 1999).

Mediante un ensayo preliminar se estableció la actividad de los extractos para estabilizar radicales libres, para tal efecto se realizó un screening rápido de decoloración del radical DPPH comparados con la acción de los patrones (AA y BHT). En distintos pozos de una microplaca se depositaron diferentes volúmenes del extracto (2-12 µl) y en cada uno de ellos se agregó DPPH (100 µl, 0.1 mM).

Este test es un método rápido y sencillo para evaluar moléculas antioxidantes pequeñas, debido a que la reacción puede observarse visualmente utilizando un equipo de laboratorio clásico, como lo es la microplaca; adicionalmente el método permite estimar semicuantitativamente la acción del material ensayado. A través de esta prueba se encontró que los extractos AHD y EEC fueron los más activos, lo que confirmó el método espectrofotométrico.

Los valores estimados al determinar la actividad estabilizadora del radical libre DPPH (AERL), la capacidad para descomponer el peróxido de hidrógeno (CDP) y el poder reductor (PR) de los extractos y de la fracción de flavonoides aislados aparecen consignados en la tabla 1.

En todos los casos se nota que la actividad de los extractos es comparable a la del BHT y al AA, sustancias utilizadas como antioxidantes en alimentos. Caso contrario se observa con las fracciones de flavonoides, cuya habilidad para estabilizar radicales libres y su poder reductor resultó ser la más baja entre los tratamientos; sin embargo, la capacidad de los mismos para desestabilizar el H₂O₂ se muestra equiparable a la de las sustancias de referencia.

Cabe mencionar que la tabla en cuestión no muestra a alguno de los tratamientos con un comportamiento particularmente sobresaliente a través de los tres ensayos aplicados; por el contrario, se observan variaciones que podrían ser parcialmente sustentables en los diversos mecanismos de acción de los antioxidantes, los cuales son dependientes de factores intrínsecos como estructura, características de solubilidad, número y posición de los sustituyentes, entre otros (Mathew & Abraham, 2006), así como también en propiedades derivadas de la naturaleza del prooxidante, su potencial reductor o del tipo de prueba a la que es sometido.

Tabla 1. Actividad estabilizante de radicales libres (AERL), capacidad de descomposición del H₂O₂ (CDP) y poder reductor (PR) de los extractos y flavonoides de *B. kalbreyeri* comparado con los patrones.

Muestra	AERL (%)	CDP (%)	PR(abs)
EEH	88,61 ± 0,5	63,95 ± 0,07	0,620 ± 0,08
EEC	95,84 ± 0,12	69,43 ± 0,04	0,620 ± 0,081
MAH	94,43 ± 0,23	100 ± 0	0,119 ± 0,005
MAC	79,09 ± 0,36	98,79 ± 0,43	0,087 ± 0,013
AHD	95,49 ± 2,36	100 ± 0	0,306 ± 0,002
ACD	83,47 ± 0,55	100 ± 0	0,331 ± 0,024
FH (flavonoides hoja)	31,82 ± 1,28	36,31 ± 4,26	0,005 ± 0,033
FC (flavonoides corteza)	18,53 ± 1	56,28 ± 1,04	0,019 ± 0,005
BHT	98,32 ± 0,47	ND	ND
AA	99,37 ± 0,47	48,05 ± 0,8	0,053 ± 0,002
AG	ND	62,1 ± 1,09	0,213 ± 0,006
RUTINA	ND	37,3 ± 0,34	ND

ND: No detectado. Los resultados corresponden a la media de tres determinaciones ± DS (n = 3)

No obstante, el análisis de varianza de un factor mostró diferencias significativas de los extractos entre sí, y entre ellos y las fracciones de flavonoides ($p < 0.05$); complementariamente permitió corroborar que la acción de los flavonoides aislados de hojas y corteza es inferior a la de los extractos. Las pruebas de comparación múltiple dejaron ver a EEC, MAH y AHD como los tratamientos de mayor efectividad en las pruebas aplicadas, dando a entender que el potencial antioxidante del vegetal no deriva directamente de los flavonoides contenidos en ellos, sino más bien de la actividad conjunta de sus metabolitos secundarios detectados a través del análisis fitoquímico: flavonoides, taninos condensados, fenilpropanoides, quinonas y terpenos, entre otros.

Entre todos los usos etnofarmacológicos atribuidos a las especies de *Bauhinia*, quizá la hipoglicemiante y diurética son las que mayor interés han despertado, convirtiendo a estos vegetales en blanco de un sinnúmero de estudios principalmente de corte clínico, no obstante los resultados han sido algunas veces contradictorios. **da Silva** y colaboradores (2002) observaron efecto hipoglicemiante del extracto hidroalcohólico de *B. variegata* en ratones normales pero no resultó así cuando la diabetes fue inducida por acción de la estreptozotocina; sin embargo **Wazlawilk** y colaboradores (2002) determinaron que los flavonoides presentes en el extracto hidroalcohólico de las semillas del mismo vegetal tienen actividad hipoglicemiante en ratas tratadas con el mismo diabetógeno.

Los resultados hasta ahora obtenidos fueron motivantes para continuar indagando sobre la funcionalidad

antioxidante de los extractos y las fracciones de flavonoides de hoja y corteza de *B. kalbreyeri*, en tal sentido, se probó la habilidad de los materiales vegetales para quelar el ion Fe⁺². No debe perderse de vista que en sistemas biológicos, las sales de hierro enlazan proteínas, membranas, ácidos nucleicos o actúan como agentes quelantes de especies de bajo peso molecular, y que la enzima superóxido dismutasa convierte el anión superóxido (O₂^{•-}) en H₂O₂ mediante la reacción de Fenton; este último en presencia de Fe⁺² produce el radical hidroxilo (OH[•]), reacción que es activada por Fe⁺² y Cu⁺, a su vez este radical ataca la doble unión de los ácidos grasos insaturados que contienen los fosfolípidos de las membranas celulares, daño que puede ocurrir en la membrana plasmática, la mitocondrial y la del retículo endoplasmático (**Bencheroun et al**, 1993; **Goeth et al**. 1990), modificando además la activación de los canales iónicos y la liberación de los neurotransmisores.

La figura 3 ilustra el comportamiento de extractos y flavonoides aislados en su acción quelante del ion Fe⁺² (AQH). Con claridad se evidencia la importante participación de los flavonoides en esta actividad, la cual resulta superior a la de los extractos y comparable a la de los patrones (EDTA y AG). No obstante todos los tratamientos alcanzaron valores cercanos al 80%, o superiores. Se entendería entonces que la acción antioxidante de la planta está fundamentalmente apoyada en la habilidad de sus constituyentes químicos para estabilizar radicales libres o bien para quelar metales.

De acuerdo a **Halliwell y Gutteridge** (1992), los flavonoides ejercen su acción antioxidante mediante dife-

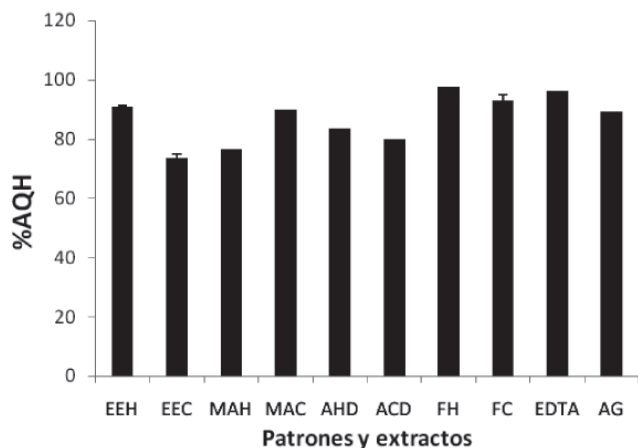


Figura 3. Actividad quelante de hierro de extractos y flavonoides de *B. kalbreyeri*, comparado con los patrones.

rentes mecanismos: suprimiendo la formación de especies reactivas del oxígeno por inhibición de enzimas o quelando elementos trazas involucrados en la producción de radicales libres, capturando especies reactivas del oxígeno o bien protegiendo las defensas antioxidantes. En el interés de probar esta actividad algunos investigadores han realizado estudios que muestran la participación de los flavonoides en la actividad antioxidante de vegetales (Giraldo *et al.*, 2003; Murillo *et al.*, 2006; Kumaran & Karunakaran, 2007).

Estos fitocompuestos intervienen en los sistemas redox biológicos, ligándose a un número de proteínas antioxidantes, tales como la transferrina, la ceruloplasmina y la proteína quinasa (Dumoulin *et al.*, 1996; Gutteridge, 1985), también se les ha registrado como inhibidores de la ciclooxigenasa, lipoxigenasa, monooxigenasa microsomal, glutatión S-transferasa, succinoxidasa mitocondrial y la NADH oxidasa, todas ellas involucradas en la generación de especies reactivas del oxígeno (Pietta, 2000).

De otra parte, se sabe que tanto el estrés oxidativo como el nitrosativo, por diversas circunstancias, tanto de carácter intrínseco como extrínseco, inducen a que los mecanismos biológicos pierdan el control sobre los radicales libres con el desbalance consecuente entre las condiciones oxidantes y las defensas antioxidantes celulares. En concordancia, resulta de particular interés evaluar no sólo el potencial antioxidante de un material vegetal sino además su capacidad antinitrosativa.

Las fracciones de flavonoides aislados presentaron actividad antinitrosativa considerable, sin embargo ésta fue menor que la de los extractos, en todas las cantidades probadas; se infiere entonces que durante el procesamiento de obtención de los extractos se separan también otros com-

ponentes que sinergizan a los flavonoides en su actividad. Los resultados ilustrados en la figura 4 y los arrojados por la prueba de comparación múltiple de dos vías aplicada, permiten deducir que el potencial antinitrosativo de los extractos no difiere en forma significativa entre ellos. La figura también deja ver una relación directa dosis-respuesta.

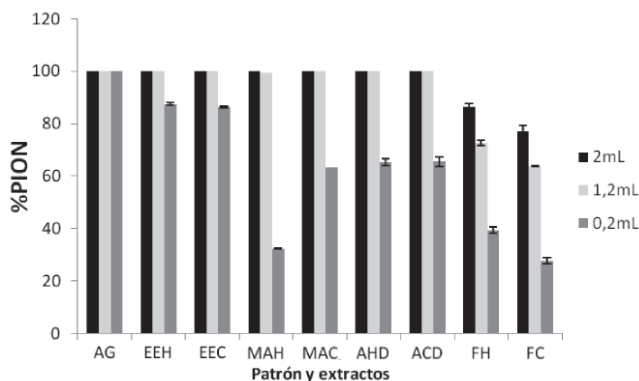


Figura 4. Potencial inhibitorio del óxido nítrico de extractos y flavonoides de *B. kalbreyeri*, comparados con el ácido gálico.

Adicional a la participación en la actividad enzimática mencionada en párrafos anteriores, a los flavonoides se les ha reconocido que también inhiben enzimas involucradas indirectamente en los procesos oxidativos, como la fosfolipasa A2 (Lindahl & Taggeson, 1997), al mismo tiempo que estimulan otras con reconocidas propiedades antioxidantes, la catalasa y la superóxido dismutasa (Sudheesh *et al.*, 1999).

Nuestros resultados demuestran que los flavonoides de las hojas y corteza de *Bauhinia kalbreyeri* colectada en Ibagué presentan actividad antioxidante manifestada a través de diferentes mecanismos. La literatura pertinente a este trabajo no muestra otros comparables, dado que los investigadores de las especies de *Bauhinia* se han interesado en probar el efecto hipoglicemiante de extractos crudos de diferente polaridad o bien a aislar metabolitos a partir de ellas; este parece ser uno de los pocos que evidencia la participación directa de los flavonoides en la funcionalidad antioxidante de una especie de *Bauhinia*.

4. Conclusiones y perspectivas

Los antioxidantes de *Bauhinia kalbreyeri* Harms, colectada en Ibagué, muestran capacidad para estabilizar radicales libres, poder reductor del ion Fe^{+3} , habilidad para quelar el Fe^{+2} y descomponer el peróxido de hidrógeno, así como también aptitud para capturar especies reactivas de nitrógeno, entre ellas el óxido nítrico (NO). Se observó que

el etanol es mejor solvente que el agua para extraer los constituyentes activos de la planta, al proceso de decocción con agua como más favorable que el de maceración, a la corteza como la mayor aportante de compuestos bioactivos y una correlación dosis-respuesta antinitrosativa. Complementariamente, la capacidad de la especie vegetal para quelar el ion Fe^{+2} es fundamentalmente soportada por los flavonoides que posee en las hojas y la corteza. Es importante tener en cuenta que la actividad antioxidante evidenciada en *B. kalbreyeri* está basada en los derivados fenólicos, los cuales sustentan, al menos en parte, las pruebas in vitro a que fue sometida.

Actualmente se está ampliando el estudio de los mecanismos de acción de los antioxidantes de *B. kalbreyeri* tales como transducción de la señal celular, proliferación y diferenciación de células, apoptosis o la inflamación; sólo así pueden tenerse ideas importantes de sus usos profilácticos, para lo cual se está probando su eficacia a través de sistemas celulares in vivo y modelos animales.

5. Bibliografía

- Ali, M. S., Azhar, i. & Amtul, Z. 1999. Antimicrobial screening of Caesalpinaceae. *Fitoterapia* **70**: 299-304.
- Bencheroun, M. N., Pourquier, P., Schott, B. & Robert, J. 1993. Dexorubicin-induced lipid peroxidation and glutathione peroxidase activity in tumor cell lines selected for resistance to dexorubicin. *Eur. J. Biochem.* **211**: 141-146.
- Da Silva, M. L & Filho, V. C. 2002. Plantas do gênero *Bauhinia*. Composição química e potencial farmacológico. *Química nova.* **25**(3): 449-454.
- Damasceno, D. C., Volpato, G. T., Mattos, I., Calderon, P., Aguilar, R. & Cunha Rudge, M. V. 2004. Effect of *Bauhinia forficata* extracts in diabetic pregnant rats: maternal repercussions. *Phytomedicine.* **11**: 196-201.
- Dasgupta, N. & De, B. 2007. Antioxidants Activity of some leafy vegetables of India: A comparative study. *Food Chemistry.* **101**: 471-474.
- Dinis, T. C. P., Madeira, V. M. C. & Almeida, L. M. 1994. Action of phenolic derivatives (acetoaminophen, salicylate and 5-aminosalicylate) as inhibitors of membrane lipid peroxidation and as perodyl radical scavengers. *Archives of biochemistry and biophysics.* **315**: 161-169.
- Duarte-Almeida, J. M., Negri, G. & Salatin, A. 2004. Volatile oils in leaves of *Bauhinia* (Fabaceae Caesalpinioideae). *Biochemical Systematics and Ecology.* **32**(8): 747-753.
- Dumoulin, M. J., Chaine, R., Atanasiv, R., Nadeau, R. & Mateescu, M. 1996. Comparative antioxidant and cardioprotective effects of ceruloplasmin, superoxide dismutase and albumin. *Arzneimittel-fors-chung-drug-research.* **46**: 588-861.
- Giraldo, B., Hernández, M. M., Angulo, P. & Fuertes, C. 2003. Actividad antinitrosativa y antiinflamatoria de los flavonoides de las hojas de *Uncaria tomentosa* Willd. D.C. (Uña de gato). *Rev. Soc. Quím. Perú.* **69**(4): 229-242.
- Goeth, M. E., Freyberger, A. & Rieder, P. 1990. Oxidate stress: A role in the pathogenesis of parkinson's disease. *J Neural Transm.* **29**: 241-249.
- Gorinstein, S., Cvikrová, M., Machackova, I., Haruenkit, R., Park, Y.-S., Jung, S.-T.; Yamamoto, K., Martinez, A. L., Katrich, E. & Trakhtenberg, S. 2004. *Food Chemistry.* **84**: 503-510.
- Gülçin, I., Büyükkurođlu, M. E., OKTAY, M. & Küfreviođlu, Ö. I. 2003. Antioxidant and analgesic activities of turpentine of *Pinus nigra* Arn. Subs. *Pallsiana* (Lamb.) Holmboe. *Journal of Ethnopharmacology.* **86**: 51-58.
- Gupta, M., Mazumder, U. K., Sambath Kumar, Gomathi, P., Rajeshwar, Y., Kakoti, B. B., Tamil Selven, V. 2005. Anti-inflammatory, analgesic and antipyretic effects of methanol extract from *B. racemosa* stem bark in animal models. *Journal of Ethnopharmacology.* **98**(3): 267-273.
- Gutteridge, J. M. 1985. Inhibition of the fenton reaction by the protein caeruloplasmin and other copper complexes. Assessment of ferroxidase and radical scavenging activities. *Chenico-Biological Interactions.* **56**: 113-120.
- Halliwell, B., Gutteridge, J. M. C., & Cross, C. E. 1992. Free radicals, antioxidants and human disease: Where are we now? *J. Lab. Clin. Med.* **119**: 598-620.
- Kumaran, A. & Karunakaran, R. J. 2007. In vitro antioxidant activities of methanol extracts of .ve Phyllanthus species from India. *Swiss Society of Food Science and Technology.* Published by Elsevier. p. v.
- Lindahl, M., & Tagesson C. 1997. Flavonoids as phospholipase A2 inhibitors: importance of their structure for selective inhibition of group II phospholipase A2. *Inflammation Vol.* **21**: 347-56.
- Matos, F. J. A. 1998. *Farmácias vivas: sistema de utilização de plantas medicinais projetado para pequenas comunidades.* 2ªed: Fozaleza: EUFC. Brazil.
- Mathew, S. & Abraham, E. 2006. In vitro antioxidant activity and scavenging effects of Cinnamomum verum leaf extract assayed by diferent methodologies. *Food and Chemical Toxicology.* **44**: 198-206.
- Murillo, E., Tique, M .M., Ospina, L F. & Lombo Ó. 2006. Evaluación preliminar de la actividad hipoglicemiante en ratones diabéticos por aloxano y capacidad antioxidante in vitro de extractos de *Bauhinia kalbreyeri* Harms. *Rev. Col. Cienc. Quím. Farm.* **35**(1): 64-80.
- Ohinishi, M. 2005. Inhibitory effects of chlorogenic acids on linoleic acid peroxidation and haemolysis, citado por Miceli, N. *et al.* Anti-inflammatory activity of extract and fractions from *Nepeta sibthorpii* Bentham.. *Journal of Ethnopharmacology.* **97**(2): 261-266.
- Oyaizu, M. 1986. Studies on product of browning reaction prepared from glucose amine. *Japanese journal of nutrition.* **44**: 307-315.
- Pietta, P-G. 2000. Flavonoids as antioxidants. *Reviews; J.Nat. Prod.* **63**: 1035-1042.

- Raj Kapoor, B., Jayakar, B. & Muruges, N.** 2003. Antitumour activity of *Bauhinia variegata* on Dalton's ascitic lymphoma. *Journal of Ethnopharmacology*. **89**: 107-109.
- Reddy, M. V. B., Reddy, M. K., Gunasekar, D., Caux, C. & Bodo, B.** 2003. A flavanone and dihydrodibenzoxepin from *Bauhinia variegata*. *Phytochemistry* **64**: 879-882.
- Rice-Evans, C. A., Miller, N.J., & Pagang, G.** 1996. Structure-antioxidant activity relationships of flavonoids and phenolic acids. *Free radical & medicine*. **20**(7): 933-956.
- Ruch, R. J., Cheng, S. J. & Klauning, J. E.** 1989. Prevention of cytotoxicity and inhibition of intracellular communication by antioxidant catechins isolated from Chinese green tea. *Carcinogenesis*. **10**: 1003-1008.
- Russo, E. M. K., Reichelt, A. A. J., De-Sa, J. R., Furlanetto, R. P., Moises R. C. S., Kasamatsu, T. S. & Chacra A. R.** 1990. Clinical trial of *Myrcia uniflora* and *Bauhinia forficata* leaf extracts in normal and diabetic patients. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*. **23**: 11-20.
- Saha, K., Lajis N. H., Israf D. A., Hamzah A. S., Khozirah, S., Khamis, S., & Syahida, A.** 2004. Evaluation of antioxidant and nitric oxide inhibitory activities of selected Malaysian medicinal plants. *Journal of Ethnopharmacology*. **92**: 263-267.
- Sanchez-Moreno, C., Larrauri, J. A. & Saura-Calixto, F.** 1999. Free radical scavenging capacity and inhibition of lipid oxidation of wines, grape juices and related polyphenolic constituents. *Food Research International*. **32**: 407-412.
- Shahidi, F., & Wanasundara, P. K .J. P. D.** 1992. Phenolic antioxidants. *Critica Reviews in Food Science and Nutrition*. **32**: 67-103.
- Silva, K. L.** Monografia de Conclusão de Curso, Universidade do Vale do Itajaí, Brasil, 1999.
- Singleton & Rossi, J.A.** 2006. Colorimetry of total phenols with phospho molybdic phosphotungstic acid reagents, citado por **Mathew, Sindhu & Abraham, E.** In vitro antioxidant activity and scavenging effects of *Cinnamomum verum* leaf extract assayed by different methodologies. *Food and Chemical Toxicology*. **44**: 198-206.
- Soares, J., Costa, S. & Cecim, M.** 2000. Níveis glicêmicos de colesterol em ratos com diabetes mellitus aloxano induzido, tratados com infusão de *Bauhinia candicans* ou *Syzygium jambolanum*. *Ciência Rural, Brasil*. **30**(1): 113-118.
- Soobrattee, N. A., Neergheen, V. S., Luximan-Ramma, A. O., Auroma, C. & Bahorum, T.** 2005. Phenolics as potencial antioxidants therapeutic agents: Mechanism and actions. *Mutation Research*. **579**: 200-213.
- Sudheesh, S., Sandhya, C., Sarah, K. A., & Vijayalakshmi, N. R.** 1999. Antioxidant activity of flavonoids from *Solanum melongena*. *Phytother Res*. **13**: 393-396.
- Viana, E. P., Santa-Rosa, R. S., Almeida, S. S. M. S., y Santos, L. S.** Constituents of the stem bark of *B. guianensis*. *Fitoterapia*. **70**: 111-112.
- Wazlawilk, E., Silva, M. A., Peters, R. R., Simões, C. M. O. & Ribeiro-Do-Vale, R. M.** 1994. IX Reunião Anual da FSBE, Caxambú, Brasil.

Recibido: enero 14 de 2008.

Aceptado para su publicación: abril 30 de 2009.

ABUNDANCIA, DISPOSICIÓN ESPACIAL E HISTORIA NATURAL DE *HYPYSIBOAS* *LANCIFORMIS* (ANURA:HYLIDAE) AL SUROESTE DE LOS ANDES VENEZOLANOS

Por

William Tovar-Rodríguez^{1,2}, Andrés Chacón-Ortiz¹, Rosa De Jesús Durán²

Resumen

Tovar-Rodríguez W.; A. Chacón-Ortiz & R. de J. Durán: Abundancia, disposición espacial e historia natural de *Hypsiboas lanciformis* (anura:hylidae) al suroeste de los Andes Venezolanos. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **33**(127): 193-200, 2009. ISSN 0370-3908.

Hypsiboas lanciformis, rana del grupo *albopunctatus*, se distribuye en Bolivia, Brasil, Perú, Colombia y Venezuela. Se estudió la abundancia, disposición espacial y se obtuvieron datos sobre la historia natural de una población localizada en las áreas pertenecientes al Complejo Uribante-Caparo, CORPOELEC, en el estado Táchira, al suroeste de los Andes de Venezuela (N 199070; E 866403), monitoreándola a través de transectos visuales y auditivos. La abundancia disminuye con el paso de la sequía y presenta disposición espacial agregada. La especie vocaliza en bordes de bosque secundario con zonas intervenidas, dispuesta desde nivel del suelo a 3m en el dosel. Comparte hábitat con los hílidos *Hypsiboas pugnax* y *Scinax manriquei*. Se pudo observar ectoparásitos y endoparásitos que podrían afectar su sobrevivencia.

Palabras clave: *Hypsiboas lanciformis*, río Doradas, represa, historia natural, Táchira, Andes, Venezuela.

Abstract

Hypsiboas lanciformis is a tree frog belonging to the *albopunctatus* group. Its distribution ranges from Bolivia, Brazil, Peru to Colombia and Venezuela. We studied the status of a population inhabiting the realms property of Complejo Uribante-Caparo, CORPOELEC, in Táchira state (southwestern Andean Venezuela), by monitoring their call and visual detection across transects,

1 Universidad Nacional Experimental del Táchira (UNET), Vicerrectorado Académico, Decanato de Investigación, Centro de Estudio de Vectores de Enfermedades (CEVE), Táchira-Venezuela, Correo electrónico: bio_will@hotmail.com, aecortiz@unet.edu.ve.

2 Universidad de Los Andes (ULA), Facultad de Ciencias, Departamento de Biología, Laboratorio de Fisiología Animal (BIOTERIO - ULA), Correo electrónico: rosadej@ula.ve.

gathering information on their abundance; available space, and other natural history accounts. The abundance decreases as the dry season progresses, while individuals show an aggregate spatial arrangement. Individuals were vocalizing at the edges of secondary forest adjacent to disturbed areas. This species is sympatric with the hylids *Hypsiboas pugnax* and *Scinax manriquei*. Some individuals revealed the presence of ectoparasites and endoparasites that might be affecting the species' survivalship.

Key words: *Hypsiboas lanciformis*, Doradas river, dam, natural history, Táchira, Andes, Venezuela.

Introducción

Hypsiboas lanciformis es una especie de rana arbórea suramericana perteneciente a la familia Hylidae, del grupo *albopunctatus*, agrupación a la que también pertenecen, *H. albopunctatus*, *H. multifasciatus* e *H. raniceps* (Faivovich *et al.*, 2005). Descrita de Pébas, Ecuador (Cope, 1870), y ha sido reportada para Bolivia (De la Riva, 1990; Cortez-Fernández, 2005), Brasil (Cardoso & Vielliard, 1990; Gascon & Pereira, 1993; Heyer, 1977), Perú (Rodríguez & Duellman, 1994), Colombia (Ruiz *et al.*, 1996) y Venezuela (Barrio, 1998; 2004; Barrio *et al.* 1999; La Marca, 1992; 1997 y Rivero, 1971). Actualmente se encuentra en la categoría de preocupación menor "Least Concern", según la lista roja de la IUCN (Azevedo-Ramos *et al.*, 2004). Esta especie estuvo inserta en el género *Hyla*, pero recientemente ha sido colocada en el resucitado género *Hypsiboas* (Faivovich *et al.*, 2005). Recientemente se han sugerido cambios en el epíteto genérico a "Boana" Gray 1825 (Wiens *et al.*, 2005), esto basado en la propuesta hecha por Duellman (2001), ya que "Boana", aun cuando ha sido acuñada como sinónimo de *Hyla* (da Silva, 1998; Duellman, 2001), esta no ha sido validada como disponible, por no cumplir con el criterio establecido en el artículo 11.6.1 (ICZN, 1999), por lo que se seguirá utilizando el género sugerido por Faivovich *et al.* (2005).

Esta especie de rana arbórea de hábito nocturno, se suele encontrar perchada sobre arbustos o árboles de mediano tamaño, siempre en zonas abiertas (Ron, 2001), cerca de pozos, donde se ha reportado su reproducción (Rodríguez & Duellman, 1994).

En Venezuela se reconocen dos subespecies: *Hypsiboas lanciformis guerreroi* (Rivero, 1971), reportada en Guatopo, estado Miranda, al norte del País. Posteriormente (Frost, 1985) la reporta para una pequeña localidad del estado Amazonas y dos años más tarde Péfaur y Díaz de Pascual (1987), ubican una población en el estado Barinas, aunque estos no indican números de museo. Barrio *et al.* (1999) amplía su distribución reportándola para el piedemonte andino del estado Táchira, sugiriéndola como una segunda subespecie (*H.l. lanciformis*). Esta subespecie habita ambientes andinos venezolanos que han

estado siendo afectados por distintas actividades humanas, principalmente agropecuarias, lo que ha conllevado a una reducción y modificación del hábitat, que sumado a la pronta construcción de la represa Las Cuevas, Segundo Desarrollo del Complejo Uribante Caparo, generará un fuerte impacto ambiental negativo.

Material y métodos

Área de estudio

El área de estudio se sitúa en el Sector Las Cuevas (Figura 1), área perteneciente a la cuenca del Río Doradas, 28 Km. Sur Sureste (SSE) de la población de Pregonero, estado Táchira, Venezuela (N 199070; E 866403). El lugar pertenece al Segundo Desarrollo del Complejo Hidroeléctrico Uribante – Caparo, filial de EDELCA, en zonas aledañas al embalse "Leonardo Ruiz Pineda", influenciado por la represa La Honda (Sierra, 1989; Chacón-Ortiz *et al.*, 2004).

En el lugar existe una convergencia de varias unidades ecológicas que abarcan desde la selva húmeda submontana hasta selva semicaducifolia montana. (Ataroff y Sarmiento, 2004; Chacón-Ortiz *et al.*, 2004). Este complejo constituye parte del Corredor Caparo, cercano al Parque Nacional Tapo-Caparo (Yerena, 1994). La vegetación presenta una elevada riqueza de vegetación secundaria entre las que destacan los géneros: *Ficus*, *Heliocarpus*, *Vismia*, *Miconia*, *Piper*, *Cecropia* y *Solanum*.

Climáticamente el área se caracteriza por tener un régimen unimodal, con lluvias entre los meses de mayo a octubre, con los máximos en junio y julio. La estación seca se sitúa entre diciembre y marzo, encontrándose en enero y febrero los meses con mayor sequía (Péfaur, 1986; Sierra, 1989; Chacón-Ortiz *et al.*, 2004). La temperatura media diaria de aproximadamente 25°C. La humedad relativa media diaria fluctúa entre 63 y 75%.

Trabajo de campo

Se realizaron recorridos libres monitoreando la población de *H. lanciformis* a través de transectos visuales y auditivos

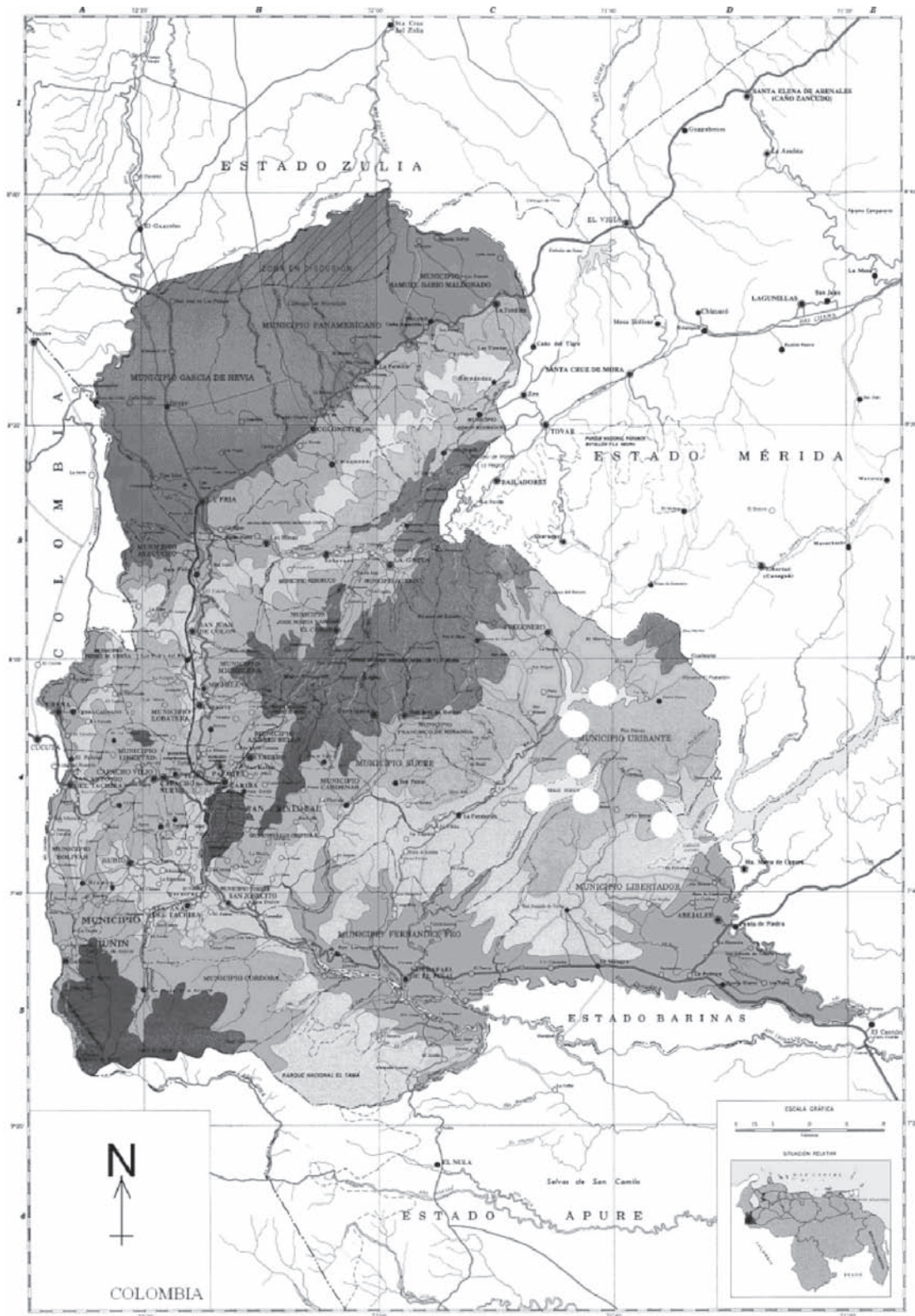


Figura. 1. Ubicación geográfica del área de estudio (círculos blancos), sector Las Cuevas, Represa Urbante Caparo. Mapa tomado del Instituto Venezolano de Geografía Simón Bolívar <www.igvsb.gov.ve/site2007>.

durante la noche, tomando datos acerca de su abundancia relativa (número de vocalizaciones por hora/hombre, utilizando en cada salida 5 personas, detectando cada individuo por su vocalización) con un esfuerzo total de muestreo de 750 horas que equivale a 75 horas mensuales a lo largo de 10 meses. La abundancia entre los meses fue comparada a través del test de Kruskal – Wallis. Se calculó su disposición espacial en el complejo Uribante – Caparo a través del índice de Morisita estandarizado (IP) (Krebs, 1999).

Se hicieron observaciones de su hábitat, considerando el tipo de planta que frecuenta, altura con respecto al nivel del suelo (estrato vertical), hora de inicio y finalización de las vocalizaciones, especies de anfibios con las que cohabita e interrelaciona y acontecimientos fortuitos que se pudiesen registrar, de tal manera de hacer una descripción de su historia natural.

Resultados

Hypsiboas lanciformis (Figura 2), se encuentra en los bordes de bosque secundario, colindando con zonas claramente intervenidas, siempre dispuesta en distintos estratos entre el nivel del suelo y 3 m de altura, ya sea sobre la hojarasca húmeda en la que se pudieron observar hembras y machos, estos últimos vocalizando todo el año. Otros individuos, cerca del 90% eran machos que se encontraban en plena actividad de vocalización entre 1,50 a 2 m, y en remotas ocasiones algunos individuos pudieron alcanzar los 3 m. Las plantas frecuentemente visitadas o utilizadas como sustrato por individuos juveniles y adultos fueron Melastomataceas, gramíneas y algunas plantas que sirvieron de resguardo por su intrincado entramado, como *Pteridium aquilinum* y *Pteridium* sp. (Pteridophytas) y *Lycopodium* sp. (Lycophyta).

Los individuos de *H. lanciformis*, formaban pequeñas agrupaciones de 4 a 11 ejemplares, manteniendo distancias variables con otros grupos. La especie presentó actividad nocturna, comenzando los machos sus vocalizaciones entre 18:15 a 19:15 horas y finalizando cerca de las 5:00 a 5:30 horas de la mañana siguiente, presentando un canto semejante al graznido de los anátidos. En la agrupación de *H. lanciformis* siempre un macho comienza la vocalización, marcando la pauta para el resto de los individuos del grupo que lo siguen en oleada de un extremo a otro del grupo.

La conformación y el número de grupos que vocalizan juntos disminuyó a medida que avanzaban los meses de lluvia, aumentando entonces, el número de ejemplares solitarios vocalizando, conservando siempre su disposición espacial, siendo esta agregada, según el índice de Morisita estandarizado ($IP = 0,505$ $p > 0,05$).

Gráficamente se observa que la abundancia de la población presenta un patrón proporcionalmente favorecido por las lluvias (Figura 4). Sin embargo estadísticamente, no presenta diferencias significativas entre ambas épocas ($p > 0,05$).

Hypsiboas lanciformis en el área de estudio comparte microhábitat con otros miembros de la familia Hylidae como son *Hypsiboas pugnax*, *Dendropsophus microcephalus*, *Dendropsophus minutus* y *Scinax manriquei*, y con algunas especies de la familia Leptodactylidae como el caso de *Leptodactylus colombiensis*, y *Leptodactylus poecilochylus*. En ocasiones el grado de relación interespecífico es tan cercano que se observó amplexus entre *H. lanciformis* e *H. pugnax* (Figura 3).



Figura 2. *Hypsiboas lanciformis*. Adulto macho. Loc.: Sector Las Cuevas, Segundo Desarrollo del Complejo Uribante Caparo, Táchira-Venezuela.

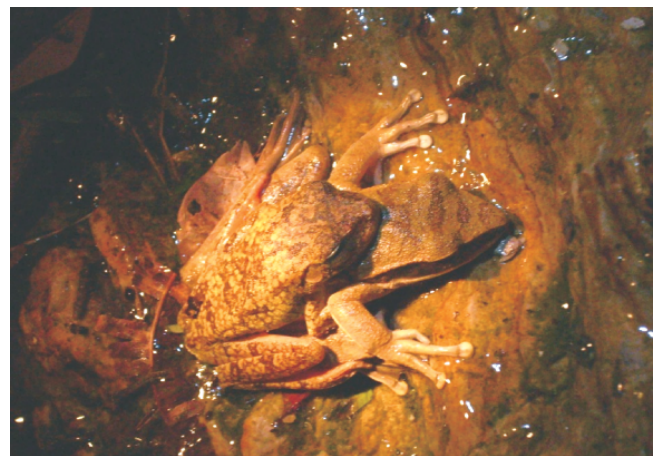


Figura 3. Detalle de intento de amplexus entre *Hypsiboas lanciformis* e *Hypsiboas pugnax*. Loc.: Segundo Desarrollo, Complejo Uribante Caparo, Táchira-Venezuela.

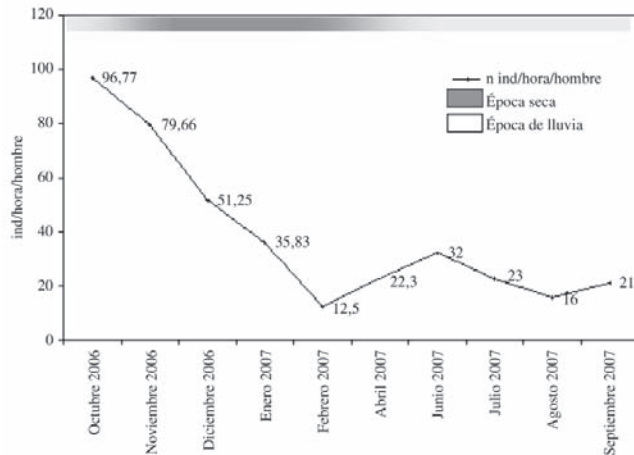


Figura 4. Abundancia poblacional de *H. lanciformis* a lo largo del periodo de muestreo, en el Segundo Desarrollo Uribante Caparo, estado Táchira-Venezuela.

En algunos ejemplares se detectó la presencia de 2 a 5 garrapatas del género *Amblyomma*, endoparásitos a nivel intestinal (*Taenia* sp.), quistes dérmicos y en el órgano hepático, pudiendo ser probablemente éstos de procedencia parasitaria o tumoral, factores que podrían afectar la sobrevivencia de la especie.

Discusión

A efectos de este trabajo se consideró que las poblaciones de *Hypsiboas lanciformis* que se distribuyen en Venezuela, tanto en el Segundo Desarrollo del Complejo Hidroeléctrico Uribante Caparo en los Andes y para la zona costera, son una especie monotípica, a pesar que **Rivero** (1971) reportó que la población para la cordillera de la costa es una subespecie que se denomina *H. lanciformis guerreroi*, pero presenta una diagnosis poco argumentada sobre estos especímenes y que **Barrio et al.** (1999) consideraron a la población andina como otra subespecie (*Hypsiboas lanciformis lanciformis*), sin presentar evidencias taxonómicas, ecológicas, biogeográficas o reproductivas que respalden tal afirmación. Sobre estas discusiones los investigadores de este trabajo, poseen evidencias osteológicas preliminares aún no publicables que podrían considerar la distribuida en Venezuela hasta una nueva entidad específica, con respecto a la descrita para *terra tipica*.

La población andina comparte con la reportada por **Lynch** (2006) para Villavicencio, en la base de la cordillera oriental de Colombia, que habitan en sitios con severa intervención y raramente en bosques nativos, en el que los adultos vocalizan desde los arbustos, así como coincide con algunos aspectos de su historia natural con lo repor-

tado por **Péfaur & Díaz de Pascual** (1987) para el piedemonte andino y llanos del estado Barinas, en el que la especie se ubica en claros de selva donde existen matorrales y charcos permanentes.

Rivero (1971) reportó para la población costera que se encontraba en las cercanías de cuerpos de agua artificial libres de vegetación, en el suelo o llamando desde heliconias a 1,5 m de altura; a pesar que existían grandes árboles en las cercanías y selva espesa a unos 40 o 50 metros de distancia, sin embargo, la población de los Andes habita en los bordes de selva, no encontrándose evidencia de individuos perchados en heliconias o cerca de estas. Por ello podría inferirse que, las poblaciones en forma generalizada de *H. lanciformis* en tiempos pasados donde no existía intervención antrópica en América, ocupaban claros de selva por árboles caídos, riveras de ríos, zonas de borde de selva con influencia de sabana o áreas desprovistas o escasas de vegetación, situación que explicaría las preferencias de la especie en la actualidad por zonas severamente intervenidas o bordes de bosque secundario. Esta rana arbórea, se encuentra dispuesta en distintos tipos de estratos, como hojarasca a nivel del suelo, en el que se encontraron tanto hembras como machos estos últimos vocalizando todo el año independientemente de la época de sequía o lluvia, mientras que otros individuos se encontraban entre 1,5 a 2 m en arbustos o árboles medianos, de los que 90% eran machos vocalizando y algunos pocos alcanzaban los 3 m., datos similares se presentaron en Ecuador, siendo estas poblaciones abundantes y activas a lo largo del año, observándose comúnmente en bosques de crecimiento secundario, frecuentando por la noche, ramas, troncos y tallos de arbustos y árboles bajos menores de 1,5 m (**Duellman**, 1978). La preferencia por el sustrato vegetal estuvo constituido por Melastomataceas, gramíneas, aunque en varias ocasiones preferían resguardarse en entramados de *Pteridium aquilinum* (Pteridophytas) o *Lycopodium* sp. (Lycophita).

La especie presentó actividad nocturna, en la que los machos comenzaban a vocalizar entre 18:15 a 19:15 horas, finalizando cerca de las 5:30 horas. Observaciones en campo demuestran que dichas vocalizaciones se mantienen durante todo el año, disminuyendo la actividad de canto en noches de luna llena o de lluvias torrenciales. En cada grupo, un macho comienza la vocalización, marcando pauta al resto de los machos que lo siguen en oleada, probablemente para confundir potenciales depredadores, pues cada ejemplar no presenta cantos frecuentes.

H. lanciformis en la zona de muestreo presenta una disposición espacial agregada ($IP \geq 0,5$), pudiendo ser esta disposición, una respuesta adaptativa de la población a am-

bientes intervenidos que los hacen ser heterogéneos con posibles óptimos ambientales restringidos, condicionados por la presencia de pequeños cuerpos de agua cercanos, u ofertas de alimento. Esta disposición se evidencia *in situ*, ya que se encuentran de 4 a 11 individuos que vocalizan en conjunto, ocupando zonas de borde de selva con vegetación densa, manteniendo distancias no constantes con grupos contiguos. A medida que avanzaba la época de lluvia, se observó una dispersión de individuos dispuestos en grupo, pasando a vocalizar de forma solitaria.

La actividad reproductiva de *Hypsiboas lanciformis* se centró hacia la época de sequía entre los meses de enero a marzo, aunque se encontraron individuos juveniles recién metamorfoseados, esta preferencia por los meses secos coincide en parte con lo reportado por **Chacón-Ortiz et al.** (2004), para *Hypsiboas pugnax*, pues de esta última especie no se conocen datos reproductivos en otros meses para la zona.

La abundancia relativa de la población presentó un patrón favorecido con la lluvia; sin embargo, no presentó diferencias significativas al compararse los meses del año entre sí ($p > 0,05$). Este aumento se puede explicar con el hecho que la especie prefiere reproducirse en la época de sequía, por lo que para el comienzo de lluvias, la mayoría de los individuos nacidos ya son juveniles independientes del agua, visibles al momento de realizar las transectas.

Esta rana áborea comparte estrechamente microhábitat con otros miembros de la familia Hylidae como son *Hypsiboas pugnax*, *Dendropsophus microcephalus*, *Dendropsophus minutus* y *Scinax manriquei*, así como con otras especies de la batracofauna como *Leptodactylus colombiensis* y *Leptodactylus poeciluchylus*. El grado de relación interespecífico en ocasiones era tan cercano que se observaron amplexus entre *H. lanciformis* e *H. pugnax* (Figura 3), sin existir razón aparente de incentivo reproductivo.

Con gran preocupación se observó la presencia de gran cantidad de ectoparásitos (2 a 5 garrapatas del género *Amblyomma*), y endoparásitos a nivel intestinal (*Taenia* sp.), quistes dérmicos y en el órgano hepático, pudiendo ser probablemente éstos de procedencia parasitaria o tumoral, factores que pudiesen estar afectando la sobrevivencia de esta especie.

Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible, sin el financiamiento del Decanato de investigación de la Universidad Nacional Experimental del Táchira (UNET), bajo el código 04-005-

2006, Desarrollo Uribante Caparo (DESURCA) bajo la figura de la Gerencia de Cuenca, División de Proyectos Ambientales y CDCHT-ULA, bajo el código C1469-07-01-F. Al Profesor de la UNET Andrés Orellana, a los Técnicos de DESURCA Nelson Sánchez, Jesús Mora y Simón Ramírez por su gran colaboración en campo. A la T.S.U. Amalia Angola, por su dedicación administrativa al proyecto. A las profesoras de la ULA, Amelia Díaz de Pascual y Marleny Chacón por el asesoramiento en el tratamiento estadístico. Al Ing. Arfilio Montilva, Med. Vet. Emmanuel Pereira, Ing. Raúl Casanova, Dr. José Luis Rodríguez, Ing. Carlos Chacón Labrador, Dr. Luis Daniel Otero, Biol. Benito Briceño y Biol. Néstor González por los aportes en esta investigación.

Literatura Citada

- Ataroff, M. & L. Sarmiento.** 2004. Las unidades ecológicas de los Andes de Venezuela. Pp: 9-26 En: La Marca, E. y P. Soriano (eds.). *Reptiles de Los Andes de Venezuela*. Fundación polar, codepre – ULA, Fundacite – Mérida, Biogeos, Mérida, Venezuela.
- Azevedo-Ramos, C., E. La Marca, L.A. Coloma & S. Ron.** 2004. *Hypsiboas lanciformis*. In: IUCN 2007. *2007 IUCN Red List of Threatened Species*. <www.iucnredlist.org>.
- Barrio, C.** 1998. Sistemática y Biogeografía de los Anfibios (Amphibia) de Venezuela. *Acta Biologica Venezuelica*. **18**(2): 1-93.
- Barrio Amorós, C. L.** 2004. Amphibians of Venezuela Systematic List, Distribution and Referentes, An Update. *Rev. Ecol. Lat. Am.* **9**(3): 1-48.
- Barrio, C. L., A. Orellana & R. Manrique.** 1999. Geographic Distribution: Anura: *Hyla lanciformis*. *Herpetological Review*, **30**(2): 106-107.
- Cardoso, A. J. & J. Vielliard.** 1990. Vocalizacoes de anfibios anuros de urrem Cruzeiro do Sul, Estado do Acre. *Revista Brasileira de Biología*, **50**(1): 229-242.
- Chacón-Ortiz A., A. Díaz de Pascual & F. Godoy.** 2004. Aspectos reproductivos y desarrollo larval de *Hyla pugnax* (Anura: Hylidae) en el Piedemonte Andino de Venezuela. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **28**(108): 391-402.
- Cope, E.D.** 1870. Eighth contribution to the herpetology of tropical America. *Proceedings of the American Philosophical Society* **11**: 556.
- Cortez-Fernández, C.** 2005. Herpetofauna de la zona norte del Parque Nacional y Área Natural de Manejo Integrado Madidi (PNANMI - Madidi). *Ecología en Bolivia*, **40**(2): 10-26.
- da Silva, H.R.** 1998. Phylogenetic relationships of the family Hylidae with emphasis on the relationships within the subfamily Hylinae (Amphibia: Anura). Ph.D. dissertation, Department of Systematics and Ecology, University of Kansas.
- De La Riva, I.** 1990. Lista preliminar comentada de los anfibios de Bolivia con datos sobre su distribución. *An. Mus. Reg. Sci. Nat. Turino* **8**: 261-319.

- Duellman, E. W.** 1978. The Biology of an Equatorial Herpetofauna in Amazonian Ecuador. Ed. Linda Trueb. 1-352 pp.
- Duellman, W.E.** 2001. Hylid frogs of Middle America. Ithaca, NY: Society for the Study of Amphibians and Reptiles.
- Faivovich, J., C. Haddad, P. Garcia, D. Frost, J. Campbell & W. Wheeler.** 2005. Systematic Review of the frog family Hylidae with special reference to Hylinae: phylogenetic analysis and taxonomic revision. *American Museum of natural history*. Number 294, 240 pp.
- Frost, D.R.** 1985. Amphibian Species of the world. A taxonomic and geographical reference. Association of systematics collection. 732 pp.
- Gascon, C. & O.S. Pereira.** 1993. Preliminary checklist of the herpetofauna of the upper rio Urucu, Amazonas Brazil. *Rev. Brasil. Zool.* **10**(1): 179-183.
- Heyer, W.R.** 1977. Taxonomic notes on frogs from the Madeira and Purus Rivers, Brasil. *Papéis Avulsos de Zoologia.* **31**(8): 141-162.
- ICZN.** 1999. International code of zoological nomenclature, 4th ed. London: International Trust for Zoological Nomenclature.
- Krebs, C.** 1999. Ecological Methodology. Second edition. Ed. Vivian McDougal. Canada. 620 pp.
- La Marca, E.** 1992. Catalogo taxonómico, biogeográfico y bibliográfico de las ranas de Venezuela. *Cuadernos Geográficos, Universidad de Los Andes.* **1**: 1-197.
- La Marca, E.** 1997. Lista actualizada de los anfibios de Venezuela. In: E. La Marca (ed), Vertebrados Actuales y Fósiles de Venezuela, pp. 103-120. Museo de Ciencias y Tecnología de Mérida, Mérida.
- Lynch, J.** 2006. The amphibian fauna in the Villavicencio region of eastern Colombia. *Caldasia* **28**(1): 135-155.
- Péfaur, J. E.** 1986. Estudio de la Calidad de agua del Embalse Uribante. Convenio MRNR. CADAPE. Facultad de Ciencias ULA. P: 124 + Anexos.
- Péfaur, J. E., & A. Díaz de Pascual.** 1987. Distribución ecológica y variación temporal de los anfibios del estado Barinas, Venezuela. *Rev. Ecol. Latinoamericana.* **1**(3-4): 9-19.
- Rivero, J. A.** 1971. Tres nuevos records y una nueva especie de anfibios de Venezuela. *Carib. J. Sci.*, **2**(1-2): 1-9.
- Rodríguez, L.O. & W.E. Duellman.** 1994. Guide to the frogs of the Iquitos region, Amazonian Peru. Asociación de Ecología y Conservación, Amazon Center for Environmental Education and Research and Natural History Museum, The University of Kansas, Lawrence, Kansas.
- Ron, S. R.** 2001. Anfibios de Parque Nacional Yasuní, Amazonía ecuatoriana. [referencia en línea]. Ver. 1.6 (28 de enero de 2008). Museo de Zoología, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Quito, Ecuador <tropicalfrogs.net/yasuni/index.htm>.
- Ruiz-Carranza, P.M., M.C. Ardila-Robayo & J.D. Lynch.** 1996. Lista actualizada de la fauna de Amphibia de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.* **20**(77): 365-415.
- Sierra N.** 1989. Estructura de la comunidad zooplanctonica del Embalse Uribante, Táchira. Tesis de grado para optar a la Licenciatura de Biología. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela. P: 163 + Anexos.
- Wiens, J.J., J.W. Fetzner, C.L. Parkinson & T.W. Reeder.** 2005. Hylid Frog Phylogeny and Sampling Strategies for Speciose Clades. *Syst. Biol.* **54**(5):719-748.
- Yerena, E.** 1994. Corredores Ecológicos en los Andes de Venezuela. Parques Nacionales y Conservación Ambiental N° 4, editorial Torino, Caracas. P.XI + 186 + 1 mapa plegable: 12 figuras.

Recibido: noviembre 28 de 2008.

Aceptado para su publicación: mayo 29 de 2009.

FUNDAMENTALS OF INFORMATION AND COMPUTATION IN THE REALM OF THE QUANTA

Por

John H. Reina*+

Resumen

Reina J. H.: Fundamentals of information and computation in the realm of the quanta. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **33**(127): 201-242, 2009. ISSN 0370-3908.

La información es un ente físico. Los sistemas físicos registran y procesan información. El reconocimiento de estos hechos desde el punto de vista de la teoría de información y su relación directa con aplicaciones a nuevas tecnologías cuánticas ha sido crucial en el desarrollo reciente la física tanto básica como aplicada, al mismo tiempo que de otras áreas tales como ciencias de la computación, matemáticas e ingenierías, donde el reto de construir dispositivos que permitan el procesamiento de información a nivel cuántico es objetivo primordial. En los trabajos de Deutsch (**Deutsch**, 1985) y Shor (**Shor**, 1994), la noción de *bit* clásico de la teoría de información fue conceptualmente extendida a un marco físico radicalmente diferente con la introducción del *bit cuántico*, donde fue demostrado que los efectos de interferencia cuántica de muchas partículas pueden permitir una forma nueva y fundamental de cómputo, donde es posible la ejecución de tareas computacionales irresolubles tales como la factorización de números primos muy grandes o la simulación exacta de sistemas cuánticos multipartitos. Así, la investigación en física de la información y cómputo cuántico se ha convertido en un foco de desarrollo básico de la fenomenología cuántica, análisis y revisión del cual se presenta en este trabajo.

Empezamos con la definición formal de qubit, registrador cuántico, y de conjunto universal de compuertas lógicas empleado en la construcción de un computador cuántico, desde la perspectiva de un modelo de computación de red cuántica. A partir de este, se enfatiza en la versatilidad de la representación de circuito cuántico para *intrincar* y *desintrincar* estados cuánticos. De aquí se introduce el “teorema de no clonación” y sus aplicaciones a criptografía cuántica. Se describen dos alternativas a la formulación ‘tradicional’ o usual de cómputo cuántico: i) computación cuántica geométrica, y ii) computación cuántica unidireccional. Se realiza la caracterización, y cuantificación de intrincamiento cuántico, en particular de sus usos como *recurso* físico en protocolos de comunicación cuántica tales como teleportación, criptografía, codificación superdensa, y compresión de datos. Se introduce el concepto de paralelismo cuántico de Deutsch y se analiza su aplicación a la resolución eficiente de tareas algorítmicas irresolubles clásicamente. La decoherencia cuántica se introduce como proceso inherente y central en el procesamiento de información cuántica. Se plantean mecanismos para corregirla o evitarla, en particular, se analiza en detalle el proceso de corrección de errores cuánticos. Finalmente, se describen algunas de las implementaciones físicas de cómputo y comunicación cuántica, y de la forma como un qubit puede ser representado físicamente en una gran variedad de nanosistemas.

* Profesor Asistente, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Departamento de Física. Universidad del Valle, A.A. 25360, Cali.

+ Electronic address: jhreina@univalle.edu.co

Palabras clave: Computación e información cuántica, intrincamiento cuántico, comunicación, algoritmos, decoherencia cuántica, corrección de errores cuánticos, qubits y nanosistemas.

Abstract

Information is physical. Physical systems register and process information. These facts have generated enormous interest in the development of novel quantum technologies, especially because the construction of smaller electronic devices ultimately leads to a consideration of quantum mechanical effects in electronic and computer designs. The notion of the classical *bit* of information theory was formally pushed into the realm of the quanta with the introduction of the quantum bit or *qubit*, in the seminal works of Deutsch (Deutsch, 1985) and Shor (Shor, 1994). They demonstrated that, indeed, controlled multipartite qubit interference effects could provide the means for a radical new way of computing, allowing the computation of many intractable computational problems, such as the factoring of large numbers or the exact simulation of large quantum systems. The field of experimental and theoretical research in quantum information and computation has emerged as a very important player in the understanding of quantum phenomena at both the basic and technological levels. This has attracted the attention of numerous researchers with backgrounds ranging from computer science, mathematics and engineering, to the physical sciences, and we now have an interdisciplinary field where great efforts are being made in order to build devices that allow the processing of information at a quantum level.

A concise introduction to the field of quantum information and quantum computation is presented. This starts with the basic definitions of bits, quantum registers, through to the universal gate-set for building the universal quantum computer, from a quantum network model of computation. The work shows how two-qubit gates suffice for quantum computation, emphasizing the power of the quantum circuit representation for *entangling* and *disentangling* quantum states. This leads to the “no-cloning theorem,” which leads us to many interesting applications, such as quantum cryptography. Two alternative approaches for performing quantum computation are also described: i) the one-way or measurement based quantum computer method, and ii) holonomic or geometric quantum computation. Following this, quantum entanglement quantification is highlighted, particularly its usefulness as a communication resource, in order to describe some of its most celebrated practical applications to date: quantum teleportation, cryptography, dense coding, and data compression. Deutsch’s concept of quantum parallelism is emphasized in order to gain insight into the potential for efficiently solving certain classically intractable algorithms. A subject central to the field of QIP - quantum decoherence - is then introduced. Possible ways to overcome it, in particular quantum error correction, are discussed. A description of some of the currently available hardware for the practical implementation of quantum computation is provided with a discussion of the main physical quantum bits that are currently employed (or proposed) for such a purpose.

Keywords: Quantum computation, entanglement, communication, algorithms, decoherence, error correction, qubits, and nanostructures.

Contents

I. Introduction	2	B. Entanglement measures	14
II. From binary digits to universal quantum computation	4	C. Examples	15
A. Bits and quantum registers	4	D. Quantum teleportation	17
B. Quantum logic and the universal quantum computer	5	Teleportation as a quantum circuit	17
Quantum parallelism	7	E. Dense coding	20
Quantum hardware requirements	8	F. Quantum key distribution	20
C. Global control quantum computation	8	G. Quantum data compression	21
D. One-way quantum computation	10	H. Quantum algorithms and quantum games	22
E. Quantum computation by geometric means	11	Quantum algorithms	22
Cyclic evolution	11	Quantum games	23
Calculating geometric and dynamic phases	12	IV. Quantum decoherence and quantum error correction	24
III. Quantum entanglement: a communication resource	13	V. Physical qubits	27
A. Quantifying quantum entanglement	13	Gating and decoherence time scales	30
		VI. Conclusions	30

A. The no-cloning theorem	31
B. Cluster and graph states	31
C. Examples of QEC codes	32
1. Example 1: <i>Bit-flip</i> σ_x -error-correction	32
2. Example 2: <i>Phase-flip</i> σ_z -error-correction	32
3. Example 3: σ_x , σ_z , & $\sigma_x\sigma_z$ -error correction	33

I. INTRODUCTION

The ways in which quantum theory can tell us about nature have been the subject of long periods of debate throughout its history since its foundation, a century ago (d’Espagnat, 1976; Mermin, 1985; Peres, 1993). Some of the very same issues that revealed most of the ‘difficulties’ (Einstein *et al.*, 1935; Schrödinger, 1935) of this theory have come to be of great practical use for technological purposes in the emerging field of quantum information processing (QIP) (Bennett & DiVincenzo, 2000; Steane, 1998; Bennett, 1995)¹.

In 1935, Einstein, Podolsky, and Rosen (EPR) (Einstein *et al.*, 1935), and Schrödinger (Schrödinger, 1935) pointed out that one such aspect of quantum theory is the phenomenon of *entanglement*. By means of predictions associated with an entangled (EPR-pair) state, EPR argued that quantum mechanics is an ‘incomplete’ physical theory because of the violation of “local realism,” a description of the world where the physical properties of spatially separated subsystems of a composite system are characterised by an ‘independent’ and ‘objective reality.’ This was the subject of many fundamental discussions concerning the basic structure of quantum theory. This conflict had to wait for almost 30 years for its resolution, when Bell reported, in his celebrated 1964 paper (Bell, 1964; Bell, 1987), that this local realism leads to constraints on the predictions of spin correlations (Bell’s inequalities), which can be *violated* by quantum theory for a system in the singlet (Bell) state $|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle$, being $|\uparrow\rangle$ ($|\downarrow\rangle$) a particle’s spin “up” (“down”) state along a given axis (Peres, 1993). After this breakthrough, several experiments (Aspect *et al.*, 1982; Selleri, 1989; Tittel *et al.*, 1998; Weihs *et al.*, 1998) were performed in support of Bell’s findings. This feature—*nonlocality*—reveals quantum entanglement at its best, an outstanding phenomenon of quantum physics. As we shall see below, quantum entanglement has led to several important practical applications for QIP, where it has been recognised as a valuable *resource* for communication at both classical and quantum levels.

After these theoretical developments, there was a further long period until we arrived to the point which settled the foundations of the field of quantum information processing. It was realised that quantum mechanical principles are not just exotic theoretical statements but fundamental for a new technology of practical information processing. This is based on the ideas of Feynman (Feynman, 1982; Feynman, 1985) and Benioff (Benioff, 1982(A); Benioff, 1982(B)) presented in 1982, and a few years later, in 1985, by Deutsch (Deutsch, 1985). These findings have developed in concrete practical applications: quantum computation (Feynman, 1982; Feynman, 1985; Benioff, 1982(A); Benioff, 1982(B); Deutsch, 1985), quantum cryptography (Ekert, 1991; Bennett *et al.*, 1992(A); Bennett *et al.*, 1992(B)), quantum teleportation (Bennett *et al.*, 1993), quantum dense coding (Bennett & Wiesner, 1992; Barenco & Ekert, 1995), and quantum games (Meyer, 1999; Meyer, 2000; Eisert *et al.*, 1999; Eisert & Wilkens, 2000; Benjamin & Hayden, 2001(A); Benjamin & Hayden, 2001(B)), all of which represent exciting new arenas in which to exploit such intrinsic quantum mechanical correlations.

The discovery of algorithms for which a computer based on the principles of quantum mechanics (Deutsch & Jozsa, 1992; Simon, 1994; Shor, 1994; Shor, 1997(A); Grover, 1997) should beat any modern digital computer has triggered intense research into realistic controllable quantum systems. Since the seminal idea of Feynman (Feynman, 1982; Feynman, 1985) and Benioff (Benioff, 1982(A); Benioff, 1982(B)), and the work of Deutsch (Deutsch, 1985), both pure and applied research in the field of quantum information processing have blossomed. In 1994, Shor (Shor, 1994; Shor, 1997(A); Ekert & Jozsa, 1996; Cleve *et al.*, 1998) opened the way to new fast quantum searching algorithms: he discovered that a quantum computer can factorize large integers. Two years later the proof that quantum error-correcting codes exist arrived (Shor, 1995; Shor, 1997(B); Steane, 1996(A); Steane, 1996(B); Steane, 1996(C)).

Regarding the physical implementations of quantum computation and information, the main areas of research include ion traps (Cirac & Zoller, 1995; Cirac & Zoller, 2000; Monroe *et al.*, 1995; Molmer *et al.*, 1999; Sackett *et al.*, 2000; Blatt & Wineland, 2008), quantum electrodynamics cavities (Pellizzari *et al.*, 1995; Turchete *et al.*, 1995; Cirac *et al.*, 1996; Cirac *et al.*, 1997; Imamoglu *et al.*, 1999; Rauschenbeutel *et al.*, 1999; Rauschenbeutel *et al.*, 2001; Greiner *et al.*, 2002; Leuenberger *et al.*, 2005), nuclear magnetic resonance (Gershenfeld & Chuang, 1997; Chuang *et al.*, 1998(A); Chuang *et al.*, 1998(B); Cory *et al.*, 1997; Knill *et al.*, 1998; Jones *et al.*, 1998(A); Jones & Mosca, 1998(B); Vandersypen *et al.*, 2001;

¹ See also the special issue of Physics World, March (1998). Note that most of the literature in the field can be found at the Los Alamos National Laboratory e-print archive, <http://xxx.lanl.gov/archive/quant-ph>.

Kane, 1998), optical lattices and Bose-Einstein condensation (Brennen *et al.*, 1999; Jacksch *et al.*, 1999; Greiner *et al.*, 2002; Mandel *et al.*, 2003; Giamarchi *et al.*, 2008; Bloch, 2008), Josephson junctions (Shnirman *et al.*, 1997; Makhlin *et al.*, 1999; Nakamura *et al.*, 1999; Averin, 1998; van der Wal *et al.*, 2000; Makhlin *et al.*, 2001; Clarke & Wilhelm, 2008; Montes *et al.*, 2009), molecular magnets (Leuenberger *et al.*, 2001; Leuenberger *et al.*, 2002), nanotubes and fullerenes (Ardavan *et al.*, 2003), single molecule arrays (Reina *et al.*, 2004), graphene quantum dots (Trauzettel *et al.*, 2007), organic polymers (Mujica *et al.*, 2009), and quantum dots (Barenco *et al.*, 1995(B); Loss & DiVincenzo, 1999; Burkard *et al.*, 1999; Reina *et al.*, 2000(A); Reina *et al.*, 2000(B); Quiroga & Johnson, 1999; Biolatti *et al.*, 2000; Troiani *et al.*, 2000; Lovett *et al.*, 2003(A); Lovett *et al.*, 2003(B); Nazir *et al.*, 2005; Fushman *et al.*, 2008; Robledo *et al.*, 2008). This is, by no means, and extensive list and many more proposals and implementations can be found in the literature. This gives an idea of the broadness of the field and of the current experimental and theoretical activity.

All of the above proposals and/or implementations have decoherence and operational errors as the main obstacles for their experimental realisation: these, as we shall see throughout this work, pose much stronger problems here than in conventional digital computers. The main challenge we face in order to process information at a quantum level is to identify a physical system with an appropriate internal dynamics and corresponding external driving forces, which enables one to selectively manipulate quantum superpositions and entanglements. A fundamental requirement for the experimental realisation of such proposals is the successful generation of highly entangled quantum states. In particular, coherent evolution of two quantum bits (qubits) in an entangled state of the Bell type (Bell, 1987; Bell, 1964; Aspect *et al.*, 1982) is relevant to both quantum cryptography and quantum teleportation. Maximally entangled states of three qubits, such as the so-called GHZ states (Greenberger *et al.*, 1989; Greenberger *et al.*, 1990), are not only of intrinsic interest but are also of great practical importance in such proposals.

Besides the capability to control and manipulate entanglement, a high level of isolation from the environment is required to reach a full unitary evolution. Quantum information processing will be a reality when optimal control of quantum coherence in noisy environments can be achieved. The various communities typically rely on different hardware methodologies. It is therefore extremely important to clarify the underlying physics and limits for each type of physical realisation of QIP systems. This work aims to give a basic introduction of the main results concerning the processing of informa-

tion at a quantum level. It is *not* intended to provide a historical review of the development of classical information theory and computer science, and the way they were linked to fundamental aspects of quantum physics to give birth to the field of quantum information theory. Instead, the background and the necessary concepts of quantum computing and quantum information are presented to further establish the framework to some physical realizations such as those of the solid-state.

For the purpose of the implementations discussed in the final part of this work, the network model of computation is adopted. Here one can imagine a quantum computer (QC) as a physical device that takes an initial state (input) into some final state (output) via a set of quantum networks that evolves in a unitary fashion. Next, the methods to build such networks are presented.

II. FROM BINARY DIGITS TO UNIVERSAL QUANTUM COMPUTATION

A. Bits and quantum registers

A binary digit, or *bit*, is the basic unit of information in classical communication and information theory. This has only two possible states: 0 and 1 in the binary system generally used in digital computers (in a proper electromechanical device, this basis can be represented by an “on-off,” or “open-closed,” or “go-no go” states). The relevance of this base-2 representation to computer technology arises from the reliable compact manner in which data can be digitally stored. For example, the year 2002 (decimal system) can be written in binary system as 11111010010. At first glance, this number appears to be more compact in base-10 than in its binary equivalent; however, a physical representation of a four digit number in base 10 requires 10^4 states, while its binary representation ‘only’ requires $2^{11} = 2048$ states: it is clear that the binary system appears to be the most convenient one for the storage and processing of the information. Therefore, we shall hereafter assume that information is stored in registers in a binary form².

² A binary string can be represented in any base b as: $c_n b^n + c_{n-1} b^{n-1} + \dots + c_1 b^1 + c_0 b^0$, where c_i are ‘place-value’ coefficients. Usually, the number representing this expansion is written as $c_n c_{n-1} \dots c_2 c_1 c_0$ (base b). For example, in the decimal system, the number 2002 is the compact way of writing $2 \times 10^3 + 0 \times 10^2 + 0 \times 10^1 + 2 \times 10^0$. Its binary equivalent is 11111010010, i.e., $1 \times 2^{10} + 1 \times 2^9 + 1 \times 2^8 + 1 \times 2^7 + 1 \times 2^6 + 0 \times 2^5 + 1 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0$, while for the Mayans (vigesimal number system) this should read 502.

In contrast to the binary digit, or classical bit, the elementary unit for the processing of quantum information is the quantum bit or *qubit*, a term coined by Schumacher (Schumacher, 1995). In this case the Boolean states 0 and 1 are represented by a pair of normalised and orthogonal quantum states labelled as $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ (Schumacher, 1995). These states form a ‘computational basis’, that we shall name the \mathcal{B}_1 -basis, so that any other state of the qubit can be written as a linear superposition $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, with $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$, $\alpha, \beta \in \mathbf{C}$. Typical examples of qubits are nuclei with spin $1/2$, two-level atoms, polarised photons, etc.

A *quantum register* (QR) of size n , is a quantum system of n qubits with a 2^n dimensional Hilbert space, and hence with 2^n mutually orthogonal quantum states available, which can be written compactly as $\{|j\rangle\}$, where j is an n -bit binary number ($j = 2^{n-1}j_{n-1} + 2^{n-2}j_{n-2} + \dots + 2^1j_1 + 2^0j_0$, $j_m \in \{0, 1\}$), and $|j\rangle$ denotes the tensor product $|j_{n-1}\rangle \otimes |j_{n-2}\rangle \cdots |j_1\rangle \otimes |j_0\rangle$, or $|j_{n-1}j_{n-2} \cdots j_1j_0\rangle$ for short. Though a qubit is a prescribed two-state system, it is fundamentally different from a classical bit. A given quantum physical system that serves for the storage, processing, and readout of a computational process by using a qubit has to deal with a microscopic system that is to be “switched *on* or *off*” by appropriately manipulating its interaction with an external driving source, bearing in mind its interaction with the other qubits of the system and also with the surrounding environment. This has an additional ingredient: the dynamics of a qubit is ruled by the principles of quantum physics. This means that while a binary string of n classical bits can store *only* one number at a given time, say

$$\underbrace{1}_{j_{n-1}} \underbrace{0}_{j_{n-2}} \underbrace{0}_{j_{n-3}} \cdots \underbrace{0}_{j_1} \underbrace{0}_{j_0}, \quad (1)$$

an n -quantum register can store a superposition of all of the 2^n mutually orthogonal quantum states $\{|j\rangle\}$ simultaneously: this is the computational power of quantum interference, which led to the so-called quantum parallelism (see below). To see this, we need to prepare the register in such a way that each qubit is in a superposition state, say $(|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$. Hence we are left with a quantum register in the state

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)_{j_{n-1}} \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)_{j_{n-2}} \otimes \cdots \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)_{j_0}$$

which in binary notation is the sum of 2^n quantum states $|j\rangle$,

$$\begin{aligned} \sum_{j \in \{0,1\}^n} |j\rangle &= |00 \cdots 00\rangle + |00 \cdots 01\rangle + |00 \cdots 10\rangle + \cdots + \\ &|100 \cdots 00\rangle + \cdots + |11 \cdots 10\rangle + |11 \cdots 11\rangle, \end{aligned} \quad (2)$$

where the normalisation factor $2^{-n/2}$ has been omitted. Eq. (2) can be written in base-10 as

$$\frac{1}{\sqrt{2^n}} \left\{ |0\rangle + |1\rangle + |2\rangle + |3\rangle + \cdots + \overbrace{|2^{n-1}\rangle} + \cdots + |2^n - 1\rangle \right\} \equiv \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{m=0}^{2^n-1} |m\rangle,$$

where the overbraced state is the quantum representation (in decimal notation) of the binary string represented by Eq. (1). Hence, it is clear that due to the quantum superposition principle, a quantum computer can, in principle, be prepared in a superposition of (and as we shall see below, can process) 2^n states in a given n -QR at once. Here, there is an important issue to be highlighted: a qubit is an extremely fragile physical system and its reliability to store and process information at will is going to be limited by the interactions that it might have with the environment that surrounds it—the problem of noise at a quantum level. This QR-environment coupling, known as *decoherence*, produces an undesirable effect over the register: it makes superpositions such as $|0\rangle + |1\rangle$ lose their phase, and therefore their ability to interfere reliably, which results in the destruction of the quantum computation. This can also be viewed as a loss of the unitarity of the quantum evolution of the QR, an essential requirement for quantum computation to occur.

B. Quantum logic and the universal quantum computer

Building blocks of a quantum computer are now introduced. As in the case of the processing of classical information in digital computers, logic gates and networks for the processing of quantum information (Deutsch, 1989) are introduced. A *quantum logic gate* is a device that performs a prescribed unitary operation on selected qubits in a definite time t and a *quantum network* is a device built of quantum logic gates whose computational steps are synchronised in time (Deutsch, 1989). Such quantum networks are to be represented by a circuit notation that accounts for the action of the logic gates. Here, a qubit is represented by a horizontal line—“wire”—that evolves in time from left to right, and single and two qubit gates are represented respectively by a prescribed symbol on one wire, and by symbols on two wires connected by a vertical line. The qubit associated with the filled dot is usually called the “control” (or source), and the other one is called the “target.” An example is shown in the following network of *size* 4 (Fig. 1):

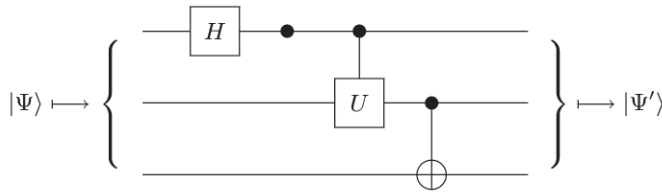


FIG. 1 A quantum network containing 4 gates. From left to right, the QR state $|\Psi\rangle$ experiences the action of the following quantum logic gates: i) Hadamard (H), ii) phase shift [$P(\varphi)$], iii) Controlled- U (U), and iv) controlled-NOT (CNOT or XOR). The network produces the final state “output” $|\Psi'\rangle \equiv \text{XOR}_{23}U_{12}P(\varphi)_1H_1|\Psi\rangle$. In this operational notation, the subscripts denote the qubits to be addressed, and in any two-qubit gate U_{ij} , i , and j denote the control and target bits respectively. Note that the first two unitary transformations are single qubit gates while the remaining ones are two qubit gates.

It turns out that *any* possible unitary transformation to be performed by a quantum computer can be simulated by an appropriate combination of the set of quantum logic gates shown in Fig. 1, i.e., by performing arbitrary single qubit rotations and two-qubit XOR (or U) gates. Thus, the sets of gates $\{P(\varphi), H, \text{XOR}\}$, and $\{P(\varphi), H, U\}$ are universal for quantum computation: *all logic gates* to be performed on a given quantum register can be constructed by composing the gates of either of these sets. These are the so-called *universal quantum logic gates* (Deutsch, 1989; Deutsch *et al.*, 1995; Barenco, 1995; DiVincenzo, 1995; Lloyd, 1995).

A quantum system capable of realising and manipulating at will a given set of universal quantum gates is said to perform *universal quantum computation*. Such a machine is the so-called universal quantum computer, a concept first introduced by Deutsch in 1985 (Deutsch, 1985; Deutsch *et al.*, 1995).

The main result to be emphasized here is that *two-qubit gates are sufficient for quantum computation*. As can be imagined, there are many combinations of gates that can be built to perform elementary ‘quantum arithmetical operations’ such as binary addition and multiplication. However, it is not the purpose of this section to describe in detail such quantum networks. Many basic constructions can be found in (Barenco *et al.*, 1995(A); van der Wal *et al.*, 2000). We are now ready to define the building blocks from which one can assemble a circuit that can evaluate any *arbitrary* Boolean function:

1. The *phase-shift gate* $P(\varphi)$ is a single qubit gate that performs the unitary operation $P(\varphi)(|m\rangle) \mapsto e^{im\varphi}|m\rangle$, where $m \in \{0, 1\}$, or $P(\varphi) \equiv |0\rangle\langle 0| + e^{i\varphi}|1\rangle\langle 1|$.

2. The *Hadamard gate* H is also a single qubit gate that performs the unitary operation known as the Hadamard transform $H(|m\rangle) \mapsto \frac{1}{\sqrt{2}}[(-1)^m|m\rangle + |1-m\rangle]$, or $H \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}[(|0\rangle + |1\rangle)\langle 0| + (|0\rangle - |1\rangle)\langle 1|]$. These gates are schematically represented in the language of quantum circuits as shown in Fig. 1. It is easy to show that by combining the set of transformations $\{P(\varphi), H\}$, any single qubit rotation can be generated. Hence, the Hadamard and the phase shift gates suffice to perform any unitary transformation on a single qubit.³ Other relevant single qubit gates are the identity $I \equiv |0\rangle\langle 0| + |1\rangle\langle 1|$; the quantum NOT gate, which in analogy with the classical NOT gate transforms $|0\rangle$ to $|1\rangle$ and vice versa: $\text{NOT} \equiv |0\rangle\langle 1| + |1\rangle\langle 0|$; and the V -gate $V \equiv P(\pi/2)$.

3. The *controlled- U* gate is a two-qubit gate that performs the operation $|0\rangle\langle 0| \otimes I + |1\rangle\langle 1| \otimes U$, where U is some prescribed single-qubit unitary transformation. This gate leaves the target qubit unchanged or applies the U gate depending on whether the control qubit is $|0\rangle$ or $|1\rangle$: $|0\rangle|m\rangle \mapsto |0\rangle(I|m\rangle)$, and $|1\rangle|m\rangle \mapsto |1\rangle(U|m\rangle)$. The network representation corresponding to this gate is shown in Fig. 1. This two-qubit gate comprises a general family of quantum gates, each of them, together with $P(\varphi)$, and H , being universal for quantum computation.

4. The *controlled-NOT* (CNOT or XOR) gate is an important example of a U gate⁴: it flips the target bit if the control bit is in the state $|1\rangle$ and acts trivially otherwise. This action can be formally written as: $\text{CNOT}(|j\rangle|m\rangle) \mapsto |j\rangle|j \oplus m\rangle$, where $j, m \in \{0, 1\}$, and \oplus denotes addition modulo 2 or XOR operation. This is why the symbol \oplus is schematically used to represent such a gate, as seen in Fig. 1.

³ To see this, compose the network $P(\varphi + \pi/2)HP(2\theta)H|m\rangle$, $m \in \{0, 1\}$. This gives the most general rotation of a single qubit:

$$V(\theta, \varphi) \equiv e^{i\theta} \begin{pmatrix} \cos \theta & e^{i\varphi} \sin \theta \\ \sin \theta & e^{i\varphi} \cos \theta \end{pmatrix}. \quad (3)$$

⁴ Another common two-qubit gate is the controlled phase shift gate $B(\varphi)$, which performs the unitary transformation: $|m\rangle|n\rangle \mapsto e^{imn\varphi}|m\rangle|n\rangle$, $m, n \in \mathcal{B}_1$. In the language of networks, this gate is represented as

$$|\Psi\rangle_{1,2} \mapsto \left\{ \begin{array}{c} \bullet \\ \text{---} \\ \bullet \\ \text{---} \\ \bullet \end{array} \right\} \mapsto |\Psi'\rangle_{1,2} .$$

The CNOT gate is usually termed as a *measurement gate* due to the fact that it maps $|m\rangle_1 |0\rangle_2 \mapsto |m\rangle_1 |m\rangle_2$, i.e., if the purpose is to measure the final state of ‘qubit 1,’ then a measurement of the output state of ‘qubit 2’ reveals the answer. The advantage of this procedure over a direct measurement of qubit 1 is that it is a “non-demolition” measurement: the original quantum state of qubit 1 remains the same after the measurement. However, this is only valid if the qubit 1 is originally in one of the two states of the computational basis $\mathcal{B}_1 \equiv \{|0\rangle, |1\rangle\}$: if $|m\rangle_1$ is initially in a superposition of the states of this basis, then the state is “collapsed” by the measurement. This is because it is impossible to build a universal quantum “cloning machine” $|\Psi\rangle |0\rangle \mapsto |\Psi\rangle |\Psi\rangle$, with $|\Psi\rangle$ being the arbitrary superposition state $|\Psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$, $\alpha, \beta \neq 0$. This important result is known as the *no-cloning theorem* (**Wootters & Zurek, 1982**); see Appendix A. In fact, if we ‘run’ the CNOT₁₂ gate over the initial state $|\Psi\rangle_1 |0\rangle_2$, we transform $(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) |0\rangle \mapsto \alpha|00\rangle + \beta|11\rangle$. This output state is known as an *entangled state* because it cannot be written as a direct product of quantum states for the two qubit register, i.e., $\alpha |00\rangle + \beta |11\rangle \neq |\Psi_1\rangle \otimes |\Psi_2\rangle$. Hence, a measurement of the output of qubit 2 should collapse the state of qubit 1. This is to be contrasted with the case of single qubit gates, where the input and the output of a general n -QR can always be expressed as a *product* or *separable state* $|\Psi_1\rangle \otimes |\Psi_2\rangle \otimes \dots \otimes |\Psi_n\rangle$, for arbitrary superpositions $|\Psi_i\rangle$.

The fact that the CNOT gate takes superpositions of the control qubit into entanglement of the corresponding output qubits is an outstanding property. In addition to this, the CNOT gate is a *reversible* gate: from its output we can reconstruct its input. It suffices to repeat the same gate, i.e., $\text{CNOT}_{1,2}(\text{CNOT}_{1,2}(|\Psi_1\rangle |\Psi_2\rangle)) \equiv |\Psi_1\rangle |\Psi_2\rangle$. Thus, the CNOT can be used to perform *reversible computation*. As we shall see below, *quantum entanglement* is at the very heart of any quantum computational process and also a fundamental ingredient of most of the ‘spooky’ technological applications that quantum information brings as a byproduct.

For illustrative purposes, let us go back to the network presented in Fig. 1. By making $U \equiv \text{CNOT}$, we are left with the *entangling* quantum network $\hat{N}_{\text{GHZ}} \equiv \text{CNOT}_{23}\text{CNOT}_{12} P(\varphi)_1 H_1$, which in the most elementary case performs the transformation

$$\hat{N}_{\text{GHZ}}(|\Psi\rangle \equiv |000\rangle) \mapsto |\Psi'\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}(|000\rangle + e^{i\varphi} |111\rangle), \quad (4)$$

thus producing a highly entangled state of three qubits known as the *maximally* entangled Greenberger-Horne-Zeilinger state (**Greenberger et al., 1989; Greenberger et al., 1990**). In Fig. 1, the action of the first

single qubit gates H , and $P(\varphi)$ is to rotate and to ‘phase-shift’ the state $|0\rangle_1$ into $\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1 + e^{i\varphi} |1\rangle_1)$ while the other qubits remain unaffected. As expected at this stage, the three-QR state is still a separable state. Next, we enter the CNOT₁₂ gate. Since its control qubit is in a superposition state, it is clear that this gate will entangle the qubits 1 and 2 of the register. Indeed, after this XOR gate operation we are left with the state $\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + e^{i\varphi} |11\rangle) \otimes |0\rangle$, the product state of the maximally entangled (Bell or EPR) state of two qubits $|\Psi_{\text{BELL}}\rangle$ (**Bell, 1987; Bell, 1964; Einstein et al., 1935**), and the qubit state $|0\rangle$. The last action of the network leaves the quantum register in the output GHZ state $|\Psi_{\text{GHZ}}\rangle \equiv |\Psi'\rangle$ of Eq. (4). The subject of quantum entanglement and the issue of how to quantify the degree of entanglement of a given entangled state is addressed in the Section III.

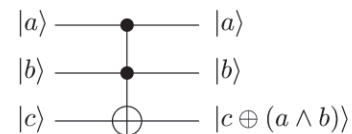
In the physical implementations to be described below, the universal set of gates $\{P(\varphi), H, \text{CNOT}\}$ shall be referred to. The logic gates $P(\varphi)$, and H , can be written in the \mathcal{B}_1 -basis, and the CNOT gate in the computational basis of two-qubits $\mathcal{B}_2 \equiv \{|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle\}$ as follows:

$$P(\varphi) \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\varphi} \end{pmatrix}, \quad H \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$\text{CNOT} \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Another fundamental logic gate, whose classical version is universal for *reversible computation*, is the “*controlled-controlled-NOT*” (c^2 -NOT) gate or Toffoli gate (**Toffoli, 1980**); a three-qubit gate that maps $|a\rangle |b\rangle |c\rangle \mapsto |a\rangle |b\rangle |c \oplus (a \wedge b)\rangle$. Hence, the third qubit experiences a flip or a NOT operation if and only if the control qubits $|a\rangle$, and $|b\rangle$ are in the state $|1\rangle$. By contrast, if the third qubit is prepared in the state $|0\rangle$ then this gate computes the AND of the first two qubits: $|a\rangle |b\rangle |0\rangle \mapsto |a\rangle |b\rangle |a \wedge b\rangle$. In addition, if we prepare $|a\rangle = |1\rangle$, then the c^2 -NOT gate becomes a CNOT gate with $|b\rangle$, and $|c\rangle$ as inputs. This means that the Toffoli gate is capable of generating operations such as NOT, AND, and CNOT in such a way that all the information about the input is ‘preserved’. Thus, the Toffoli gate provides us with a complete operator set: any gate can be generated with just a c^2 -NOT gate, thus giving the logical connectives for performing quantum arithmetic and the evaluation of functions in general.

The Toffoli gate is schematically represented as



where the filled dots indicate the control qubits while the target qubit, denoted by \oplus , is negated if and only if the control bits are in the state $|1\rangle|1\rangle$. The action of this gate can be written operationally as $c^2\text{-NOT}_{ijk}$, where i, j (k) stand for the control (target) qubits. The Toffoli gate can be built from the controlled- V ($C\text{-}V$), CNOT, and Hadamard gates as follows: $c^2\text{-NOT}_{123} \equiv H_3V_{13}\text{CNOT}_{12}V_{23}^\dagger\text{CNOT}_{12}V_{23}H_3$, where $C\text{-}V^\dagger \equiv C\text{-}V^{-1}$. Similarly, the CNOT gate can be constructed by applying a simple network of H , and $C\text{-}V$ gates as follows: $\text{CNOT}_{12} \equiv H_2V_{12}V_{12}H_2$. There are, of course, plenty of quantum networks that can be built to represent the above-mentioned gates, but there is a main concern when building such networks: it is desirable and almost necessary to minimise the number of gates required to perform a given quantum computational task.

Quantum parallelism

The fact that a quantum system is capable of performing a computation was first pointed out by Feynman (**Feynman**, 1982; **Feynman**, 1985) and Benioff (**Benioff**, 1982(B); **Benioff**, 1982(A)) in 1982. However, it was Deutsch (**Deutsch**, 1985), in 1985, who made this idea more concrete by establishing that a quantum computer can perform the best of its computational potential by realising a process that he termed “quantum parallelism.” By doing this, it is easy to see that a quantum computer can perform certain computational tasks much faster than any classical digital computer. This observation turns out to be the first quantum algorithm, known as the Deutsch-Josza algorithm (**Deutsch & Jozsa**, 1992), where physical principles such as quantum interference and quantum entanglement were made evident as a powerful computational resource.

To see why this is so, suppose we are given a device “oracle” that computes the Boolean function $f : x \in \{0, 1\} \mapsto f(x) \in \{0, 1\}$ in a single step. The problem is to determine whether $f(x)$ is *constant* (i.e., $f(0) = f(1)$), or *balanced* ($f(0) \neq f(1)$), with the minimum possible number of queries. It is clear that any attempt at solving this by using classical means invokes the oracle twice. In contrast, we note that with the help of a quantum strategy, a “quantum oracle \mathcal{U}_f ” that performs the unitary transformation $\mathcal{U}_f : |x\rangle|y\rangle \rightarrow |x\rangle|y \oplus f(x)\rangle$ in a single step, this problem is easily solved with only one query. Here $x, y \in \mathcal{B}_1$. Imagine a two wire network that is given with the input $|\Psi_0\rangle = |0\rangle(|0\rangle - |1\rangle)/\sqrt{2}$. The following algorithm shows how to solve this (Deutsch’s) problem efficiently:

1. Apply the Hadamard transform to the first qubit:

$$H : |\Psi_0\rangle \rightarrow |\Psi_1\rangle, \quad |\Psi_1\rangle \equiv \frac{1}{2}(|0\rangle + |1\rangle)(|0\rangle - |1\rangle) \quad (7)$$

2. Send the two-qubit state $|\Psi_1\rangle$ through the quantum oracle. This gives you the result

$$\mathcal{U}_f : |\Psi_1\rangle \rightarrow \frac{1}{2}[(-1)^{f(0)}|0\rangle + (-1)^{f(1)}|1\rangle](|0\rangle - |1\rangle) \equiv |\Psi_2\rangle \quad (8)$$

Note that the generic action of this function evaluator \mathcal{U}_f over a state of the type $|x\rangle(|0\rangle - |1\rangle)$ gives the output $(-1)^{f(x)}|x\rangle(|0\rangle - |1\rangle)$.

3. Apply H to the first qubit of $|\Psi_2\rangle$. Then perform a measurement in the \mathcal{B}_1 -basis of qubit 1 final output. The result of this measurement reveals the answer to our problem.

Note that the state of qubit 1 in Eq. (8) can be written as

$$(-1)^{f(0)}|0\rangle + (-1)^{f(1)}|1\rangle = \begin{cases} \pm(|0\rangle + |1\rangle) & \text{if } f \text{ is constant} \\ \pm(|0\rangle - |1\rangle) & \text{if } f \text{ is balanced} \end{cases} \quad (9)$$

Hence, after step 3 of this protocol, we shall always find qubit 1 in the state $|0\rangle$ if the function is constant and $|1\rangle$ if the function is balanced. Also note that qubit 2 remains in the same state throughout this protocol. Thus, by using quantum superpositions instead of classical evaluations, we have solved this problem with just one query (throughout the whole process we have assumed a coherent evolution of the qubit states). The power of quantum parallelism becomes even more evident when we try to solve the same problem but for large registers, i.e., when $x \in \{0, 1\}^n$. This will be discussed later in Subsec. III.H. Thus, Deutsch pointed out one of the most outstanding properties of a quantum computer and paved the way for the development of the field of quantum information processing.

So far, we have been concerned only with the formal framework that allows an introduction of all the elements required to perform universal quantum computation. However, nothing has been said about concrete physical implementations that may lead to a practical demonstration of the quantum logic gates introduced above. This point shall be returned to later, to briefly describe the experimental hardware currently used for a few qubit quantum computation and possible future prospects. As you may imagine, the extremely fragile nature of the quantum states used as qubits means that the requirements necessary for any hardware useful for quantum computation are rather stringent. As we have pointed out, the dynamics of a qubit physical evolution on a quantum computer is ruled by the laws of quantum physics. Thus, we should expect any unitary transfor-

mation or quantum gate U (e.g., the matrix operator $U \equiv \text{CNOT}$ given in Eq. (6)) to be represented by an operator $U(t)$

$$U(t) = \mathcal{T} \exp \left(-\frac{i}{\hbar} \int \mathcal{H}(t) dt \right), \quad (10)$$

such that $U(t) \equiv U$. Here, \mathcal{T} denotes time-ordering, and \mathcal{H} is the Hamiltonian that describes the physical system used to represent the qubits. Thus, the dynamic action of a quantum gate can be viewed in terms of the time evolution of the unitary matrix $U(t)$ which, according to the quantum mechanical Schrödinger's equation, connects the initial wavefunction coefficients to the final ones: mapping on the qubit basis states uniquely specifies the dynamics of an *arbitrary* initial quantum state. Hence, it should be possible to identify a Hamiltonian \mathcal{H} , acting over a definite time t , that produces the desired U -gate. This is the main idea behind any intended physical implementation of quantum computation. In practice, there are different quantum hardware that exploit different types of Hamiltonians in order to implement such quantum logic gates.

Quantum hardware requirements

The building of hardware for a quantum computer implies the processing of quantum information in a *coherent* fashion (see Sec. IV). Regardless of the chosen technology, we need the feasibility to reliably perform the following experimentally:

1. Preparation and Storage: We must be able to *prepare* an n -quantum register in a definite state such as $|00 \cdots 00\rangle$, and to *store* the information used while processing the quantum computation for a time long enough to perform an arbitrarily complex computational task⁵.
2. Isolation: The quantum register must be well isolated from the environment, so that we can minimize the errors due to decoherence.
3. Measurement: We must be able to efficiently measure the QR states in the basis \mathcal{B}_1 .
4. Unitary operations: We must be able to manipulate individual qubit states, and to have control over the

interactions among qubits, so that we can perform universal quantum gates over any subset of gates of the quantum register.

5. Precision: We must be able to control the unitary evolution of the register in such a way that the gates are implemented with high precision.

Some aspects of this prescription shall be made more precise below, especially when discussing the subject of 'quantum errors' that need to be taken into account when performing practical quantum computation (see Sec. IV). The subject of quantum hardware practicalities will be returned to in Section V, where different physical systems that may serve as quantum registers are explored.

C. Global control quantum computation

Aside of the traditional '*local*' control (LC) mechanism for the implementation of localized multi-qubit gates in a quantum register, there is the so-called '*global*' control (GC). As described above, in LC quantum computation (LCQC), an induced evolution in the system requires the *direct* individual localization of the computational qubits. This fact can pose a difficulty regarding the physical implementation of the computing process, especially at scales where the manipulation invokes more than a few qubits register. By contrast, in GC quantum computing (GCQC) the induced evolution of the system doesn't require direct individual localization of the computational qubits to be targeted by the logic gates; and we can induce a localized gate by using the instructions stored in the register's initial configuration (Lloyd, 1993; Benjamin, 2000, 2002; Benjamin *et al.*, 2005; Jaramillo & Reina, 2008). Thus, from the viewpoint of quantum information technologies, it may be more promising to be able to realize unitary manipulations within the quantum register in a global fashion.

The GCQC models are arrays of two level quantum systems interacting, in first approximation, with their nearest neighbours. There exists a finite number of "qubit species" distributed in an alternate manner within the arrays, as shown schematically in Fig. 2(a). Here, each species can be collectively manipulated in an independent way. An example of a physical realization of such architectures is a periodic and finite set of frequencies $(\omega_B \omega_A \omega_B \cdots)$ manipulated through resonant radiofrequency (RF) pulses. Between the '*computational*' qubits, those effectively involved in the computation, there are auxiliary qubits or "ancillae", with purely operative functions which are initialized in the computational state $|0\rangle^{\otimes m}$. Besides the ancillae, there is a "special qubit", the

⁵ In practice, this time is bounded by *decoherence* of the register states (see Sec. IV).

“control unit”, whose role is to localize and ‘transport’ information between the computational qubits. One qubit gates, for example, are performed in two steps: first, the control unit is taken near enough to the computational qubit to be modified, and then the desired gate is performed over the computational qubit, as a controlled gate, where the control unit acts as the control qubit.

We next introduce some interesting architectures and their respective operative protocols.

i) **Model 1 (BM1)**. Proposed by Benjamin (Benjamin, 2002), this is one of the simplest models for GCQC; it consists of two species of *physical* qubits, *A* and *B*, as shown in Fig. 2. The computational qubits are encoded in physical qubits ($|0\rangle \equiv |\uparrow\rangle$ and $|1\rangle \equiv |\downarrow\rangle$) belonging exclusively to a given species with the exception of the “special qubit” or “control unit”, which is initialized in a different species at the computational state $|1\rangle$. There are arrays of three and five ancillae qubits alternately distributed between the computational qubits (see Fig. 2(b)). The generic Hamiltonian for this system is given by $H = \sum_{j=1}^n H_j^s + \sum_{j=1}^n H_{j,j+1}^{\text{int}}$, where the first term is associated with the individual qubit energy and the latter with the interaction energy between neighbouring qubits. The particular characteristics of the system reduce the total Hamiltonian to the form (Benjamin, 2002):

$$\begin{aligned} H_{2j} &= H^A, \\ H_{2j+1} &= H^B, \\ H_{2j,2j+1} &= H^{AB}, \\ H_{2j+1,2j} &= H^{BA}. \end{aligned} \quad (11)$$

This model works as long as the following conditions are fulfilled: a) it has to be possible to control the suppression of the interaction process due to H^{BA} , in a way that the system reduces to a set of pairs A-B interacting identically through H^{AB} ; b) any quantum gate must be able to be realized, in the A-B pairs, through the manipulation of the remaining terms: H^A , H^B and H^{AB} ; c) as in the requirements a) and b), but this time suppressing the interaction H^{AB} . These conditions may, however, pose a challenge from an experimental point of view (Benjamin *et al.*, 2005). To alleviate such difficulties, a strategy that incorporates a third energy level as part of one of the qubit species (a “barrier”), has been put forward in (Benjamin *et al.*, 2005), at the cost of increasing the number of species in the array.

As an illustration, in Fig. 2(c) we show how to perform a one computational qubit gate: the control unit is located at an adjacent cell from the target qubit (**Y**). Making sure that the interacting Hamiltonian between the target and the control unit is turned on (H^{AB}), any

arbitrary controlled gate ($Ctrl - U$) can be performed by means of using the species where the control unit is

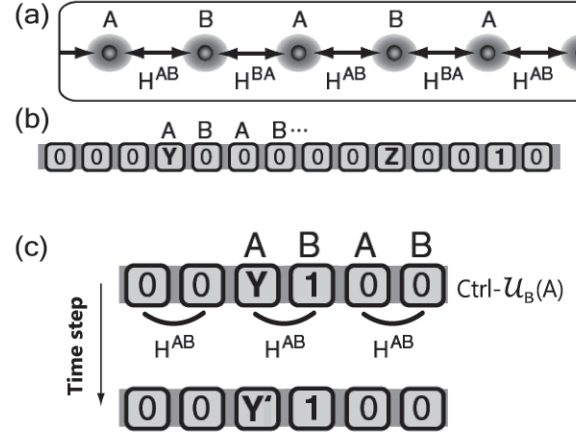


FIG. 2 (a) Schematic of a periodic array of two types of qubits (*A* and *B*), present in the architectures *BM1* and *BM2* (see text) for quantum computation based on global control. (b) Array of ancillae and computational qubits in architecture *BM1*. (c) One qubit gate U acting selectively on qubit **Y**. The gate is indirectly performed using the controlled quantum gate $Ctrl_U(A)$, which uses the H^{AB} interaction Hamiltonian. The “control unit” acts as the control qubit and assures the localized action of U (Jaramillo & Reina, 2008).

located as the *control* qubit and the species where the target computational qubit is located as the *target*.

ii) **Model 2 (BM2)**. This model actually precedes *BM1* (Benjamin, 2000). It has the same Hamiltonian configuration specified in Eq. (11). Unlike *BM1*, this model doesn’t require the ability to independently control the interacting Hamiltonians, H^{AB} and H^{BA} . This benefit doesn’t come free; in this case the computational qubits are encoded in four physical qubits, as follows: $|0\rangle \equiv |\uparrow\uparrow\downarrow\downarrow\rangle$ and $|1\rangle \equiv |\downarrow\downarrow\uparrow\uparrow\rangle$. Between every encoded computational qubit there are four ancillae qubits. The “control unit” is also encoded, but in a different configuration: $|\uparrow\uparrow\downarrow\downarrow\uparrow\uparrow\rangle$ and $|\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow\rangle$, representing the computational states $|1\rangle$ and $|0\rangle$, respectively. The complete array is shown in Fig. 3(a). The operational gates which, applied sequentially, perform any *computational gate*, are symmetric three qubit gates of the generic form

$$\begin{aligned} M(u_{00}, u_{01}, u_{10}, u_{11}) &= |00\rangle\langle 00| \otimes u_{00} + |01\rangle\langle 01| \otimes u_{01} + \\ &|10\rangle\langle 10| \otimes u_{10} + |11\rangle\langle 11| \otimes u_{11}, \end{aligned} \quad (12)$$

where M acts simultaneously over every physical qubit of a given species and the symmetric condition $u_{01} = u_{10}$ is fulfilled. This condition is compatible with the fact that neighbouring qubits are of the same species and therefore only symmetric gates are physically feasible.

Both models, $BM1$ and $BM2$, perform computational two-qubit controlled gates using the control unit as the

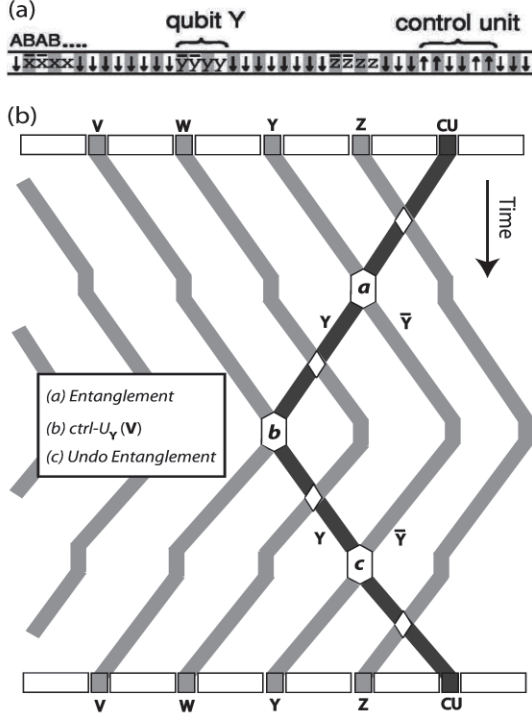


FIG. 3 (a) Array of ancillae and computational qubits in architecture $BM2$. (b) Heuristic protocol for two-qubit (V and Y) computational gates in models $BM1$ and $BM2$. Computational qubits are in light gray and distinguished by letters. The white space between computational qubits corresponds to ancillae qubits, and the line in dark grey corresponds to the control unit path (Jaramillo & Reina, 2008).

carrier of information from the “control” qubit to the “target” qubit. This is done through the entanglement between the control unit and the control qubit, as illustrated in Fig. 3(b). In (Jaramillo & Reina, 2008), we show that in order to perform a more general two-qubit gate under the former protocol, two controlled gates are required; a fact that triples the computational time. To see why this is so, consider the case where a general two-qubit gate is performed through the scheme depicted in Fig. 3(b). In this case, the state of the control unit (dark gray) approaching step (c) may

carry information about qubit state V , given the action of the general two-qubit gate performed at step (b). This disables the possibility of recovering the original localized qubit state Y through the step (c) where the entanglement is destroyed.

iii) **Model 3 ($LM3$)**. Introduced by Lloyd (Lloyd, 1993), this model is perhaps the first proposal for GCQC. It has three different species distributed in a periodic array $ABCABCABC$. Here, there’s no need to control interacting Hamiltonians and computational qubits are encoded in physical qubits belonging exclusively to a given species, just as in $BM1$. There are two ancillae qubits between the computational qubits.

	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Time step (1)	W	0	1	X	0	0	Y	0	0	Z	0	0
(2)	0	W	1	X	0	0	Y	0	0	Z	0	0
(3)	0	W	X	1	0	Y	0	0	Z	0	0	0
(4)	0	X	W	1	Y	0	0	Z	0	0	0	0
	⋮				⋮			⋮				⋮
(5)	0	0	0	X	0	0	Y	W	1	Z	0	0

FIG. 4 Protocol for a two-qubit quantum gate between arbitrary computational qubits W and Z , in architecture $LM3$. Every computational qubit is initiated at qubit species A . (1) The control unit is located at the neighbourhood of W , in this case W is at species A , while the control unit is at species C . (2) A controlled $SWAP$ gate between species A and B is applied by using qubits at species C as the control qubits. Given the location of the control unit, only the computational qubit W will be transferred to species B . (3) A $SWAP$ gate is applied between species A and C . (4) A $SWAP$ gate is applied between species B and C . (5) Steps 2, 3, and 4 are applied again. The register is ready to implement a two-qubit gate between computational qubits W and Z using the control unit. This is done after applying a controlled two-qubit gate between species A and B , where the species C acts as the control qubit. Any other operation can be reverted so that the modified computational qubits W and Z can go to their initial locations in the register (Jaramillo & Reina, 2008).

The operative gates that add up to perform computational gates are non-symmetric three qubit gates of the generic form given by Eq. (12). Unlike the models above, two-qubit gates are performed by the transportation of one of the computational qubits to a position adjacent to the second computational qubit involved in the two-qubit gate. This process, illustrated in Fig. 4, is performed by using the control unit to exclusively transport the first computational qubit (W) through the register. Once the control unit and the two computational qubits (W and Z) are all in the same neighbourhood, ABC , the system is ready to apply any two-qubit computational gate,

where only the former computational qubits are involved. This is assured given that the control unit acts as a control qubit for the action of the two-qubit gate over the former computational qubits.

Recently, a proposal that uses organic polymers to encode the qubits in the global scheme proposed in (**Benjamin et al.**, 2005) has been put forward in molecular architectures for GCQC (**Mujica et al.**, 2009).

D. One-way quantum computation

Aside of the standard local and global quantum computation described above, which are performed through a series of unitary quantum logic gates as part of a multipartite quantum interference circuit, there is another method which is based on a radically different concept. This is the so-called *one-way* quantum computing proposal of Raussendorf and Briegel (**Raussendorf & Briegel**, 2001). In this view, the requirements for performing conventional QC are reformulated. In the one-way or measurement based quantum computer method, the qubits are initially prepared in the form of a highly entangled *resource* state: a cluster or a graph state; see Appendix B (**Raussendorf & Briegel**, 2001; **Briegel & Raussendorf**, 2001). After this, the computation follows the implementation of a sequence of single-qubit measurements with classical feedforward of their outcomes, and therefore, the resource state is destroyed by the measurements and the one-way quantum computer becomes irreversible (hence the term “one-way”). As a consequence, the order and choices of measurements determine the algorithm computed. As a general rule, the choices of basis for later measurements *do depend* on the results of the earlier ones, and hence the measurements cannot all be performed at the same time (**Raussendorf & Briegel**, 2001).

There exist an *equivalence* between the one-way computation and the quantum circuit model: the former can be made into a quantum circuit by using quantum gates to prepare the resource state. For cluster and graph-resource states, this requires only one two-qubit gate per bond, so is efficient. It turns out that any quantum circuit can be simulated by a one-way computer using a two-dimensional cluster state as the resource state, by laying out the circuit diagram on the cluster: Z measurements ($\{|0\rangle, |1\rangle\}$ basis) remove physical qubits from the cluster, while measurements in the X - Y plane ($\{|0\rangle \pm e^{i\theta} |1\rangle\}$ basis) teleport the logical qubits along the “wires” and perform the required quantum gates (**Raussendorf et al.**, 2003). This is also polynomially efficient, as the required cluster size scales as the size of the circuit (qubits \times timesteps), while the number of measurement timesteps scales as the number of circuit timesteps.

In (**Walther et al.**, 2006), the experimental realization of four-qubit cluster states encoded into the polarization state of four photons has been reported. They characterized the quantum state by implementing experimental four-qubit quantum state tomography. Using this cluster state, they demonstrated the feasibility of one-way quantum computing through the construction of a universal set of one- and two-qubit logic gates. Furthermore, Walther *et al.* (**Walther et al.**, 2006), succeeded in implementing a basic Grover’s search algorithm. More recently, the same group (**Prevedel et al.**, 2007) has demonstrated, by running the two-qubit Grover’s algorithm on a 2×2 cluster state of photons, the execution of one-way quantum computation. This shows that indeed, one-way QC can be suited for such computing tasks. In addition, a *linear optics* quantum computer based on one-way computation has been proposed in (**Brown & Rudolph**, 2005), and cluster states have also been created in *optical lattices* (**Mandel et al.**, 2003).

Next, another way to realise quantum computation is discussed, the so-called *geometric* or *holonomic quantum computation* (**Zanardi & Rasetti**, 1999; **Pachos et al.**, 1999; **Pachos & Chountasis**, 2000).

E. Quantum computation by geometric means

It is interesting that there is an alternative way of performing quantum computations. This is built on the results of Berry (**Berry**, 1984; **Wilczek & Zee**, 1984; **Shapere & Wilczek**, 1989), who showed that a quantum system under cyclic evolution acquires, besides the dynamic phase induced by the time evolution of the system, a *geometric phase*, the so-called Berry phase. It can be shown (**Zanardi & Rasetti**, 1999; **Pachos et al.**, 1999; **Pachos & Chountasis**, 2000; **Ekert et al.**, 2000(A)) that universal quantum gates can be implemented by purely geometric means, i.e., by using Abelian and non-Abelian geometric computations (holonomies) (**Berry**, 1984; **Wilczek & Zee**, 1984; **Shapere & Wilczek**, 1989) rather than dynamic ones. The holonomies can be either Abelian phase factors (Berry phases) or general non-Abelian operations, depending on whether the eigenspace of the system’s Hamiltonian is nondegenerate or degenerate. An interesting feature of the holonomic quantum computation is its potential robustness to certain types of computational errors, hence offering a natural way of performing *fault-tolerant* quantum computation. Let us formally establish the idea of a cyclic evolution to build the geometric phase and the non-Abelian Berry phase (non-adiabatic state evolution):

Cyclic evolution

The concept of a cyclic evolution is based on the adiabaticity (**Galindo & Pascual**, 1990) of the quantum state evolution of a given physical system, say the vector state $|\Psi\rangle$. In quantum mechanics, a basic goal is to calculate amplitudes, and then square them to obtain the probability of an event. Formally, in a Hilbert space \mathbf{H} , we have $|\langle\Psi|\Psi\rangle|^2 = 1$. However, this implies an ambiguity: there is no physical distinction between the two states $|\Psi\rangle$, and $e^{i\varphi}|\Psi\rangle$. To fix this, the projective space \mathbf{P} is introduced, in which vectors are grouped into equivalence classes such that we map $\mathbf{\Pi} : \mathbf{H} \rightarrow \mathbf{P}$, where $|\Psi\rangle \mapsto [|\Psi\rangle] = \{|\Psi'\rangle : |\Psi'\rangle = re^{i\varphi}|\Psi\rangle\}$, for any $r > 0$ and real φ (**Ekert et al.**, 2000(A)). Hence, a cyclic evolution of the system's state $|\Psi\rangle$ translates into a closed curve $\mathbf{\Pi}(\mathcal{C}) \in \mathbf{P}$ covered in a period τ . In \mathbf{H} the situation is rather different: at $t = \tau$, the path $\mathcal{C} \in \mathbf{H}$ followed by the initial state $|\Psi(0)\rangle$ no longer coincides with the final state $|\Psi(\tau)\rangle$ of the system: there is a phase difference of $e^{i\varphi}$ between them. This phase can be determined by making the following (adiabatic) approximation: for each point $|\Psi(t)\rangle$ on \mathcal{C} , $t \in [0, \tau]$, we can choose a $|\Psi_{\Pi}(t)\rangle$ from $\mathbf{\Pi}(\Psi(t))$ in such a way that $|\Psi_{\Pi}(0)\rangle = |\Psi_{\Pi}(\tau)\rangle$. Hence we can write

$$|\Psi(t)\rangle = e^{if(t)} |\Psi_{\Pi}(t)\rangle, \quad (13)$$

where the phase change of $|\Psi(0)\rangle$ is now given through the function $f(t)$: $\varphi = f(\tau) - f(0)$.

Calculating geometric and dynamic phases

Let us start by writing the system's Schrödinger equation

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi(t)\rangle = \mathcal{H}(t) |\Psi(t)\rangle, \quad (14)$$

where $\mathcal{H}(t)$ represents the system's Hamiltonian. From Eqs. (13), and (14) we obtain

$$\begin{aligned} \varphi = \int_0^{\tau} df(t) &= -\frac{1}{\hbar} \int_0^{\tau} \langle\Psi(t)| \mathcal{H} |\Psi(t)\rangle dt + \\ &+ i \int_0^{\tau} \langle\Psi_{\Pi}(t)| \frac{d}{dt} |\Psi_{\Pi}(t)\rangle dt. \end{aligned} \quad (15)$$

Hence, we end up with a total phase φ which is built of a *dynamic phase* δ that depends on the Hamiltonian $\mathcal{H}(t)$, and a *geometric phase* γ that depends only on the path \mathcal{C} , and is independent of the rate at which $|\Psi(t)\rangle$ completes \mathcal{C} , the Hamiltonian, or the choice of reference $\{|\Psi_{\Pi}\rangle\}$ (**Ekert et al.**, 2000(A)). These geometric and dynamic phases can be calculated as:

$$\gamma = i \oint_{\mathcal{C}} \langle\Psi_{\Pi}| d|\Psi_{\Pi}\rangle \quad (16)$$

$$\delta = -\frac{1}{\hbar} \int_0^{\tau} \langle\Psi(t)| \mathcal{H} |\Psi(t)\rangle dt. \quad (17)$$

A particular case of the geometric phase γ is the Berry's phase (**Berry**, 1984), which occurs when the system's dynamics is performed under adiabatic conditions. This imposes restrictions over the rate at which $|\Psi(t)\rangle$ completes a given cyclic evolution. A fundamental characteristic of the Berry phase is that the energy eigenspace of the instantaneous Hamiltonians is non-degenerate along the path \mathcal{C} . As a model example, it can be shown, by using Eq. (16), that the Berry phase of a spin-half particle located in an external oscillating field gives the result

$$\gamma = -\pi(1 - \cos \theta), \quad (18)$$

where θ is the angle between the Bloch vector and the z -axis (**Ekert et al.**, 2000(A)). As said, it is assumed that through the qubit cyclic evolution, the Hamiltonian parameters are changed adiabatically. The generalization of this result to any closed path gives $\gamma = \Omega/2$, where Ω is the solid angle enclosed by \mathcal{C} on the Bloch sphere (**Berry**, 1984). Thus, the Berry phase depends only on the area covered by the motion of the system, and is independent of the details of how this motion is executed.

The results explained above constitute an alternative approach to quantum computation. Here, quantum gates can be built by using purely holonomies. A procedure to perform this is outlined in (**Ekert et al.**, 2000(A)) for the case of a nuclear magnetic resonance (NMR) system via the use of the Abelian Berry phase. Experimental work has combined the above results to perform a first step towards geometric quantum computation (**Jones et al.**, 2000). The Abelian geometric phase has been used to experimentally demonstrate the controlled phase shift gate $B(\varphi)$ in an NMR system (**Jones et al.**, 2000). There is also another proposal for doing this via a Josephson junction system (**Falci et al.**, 2000). However, to be able to perform universal geometric quantum computation we need to combine this particular geometric gate (or any other two-qubit entangling gate) with single qubit gates. The proposals reported in (**Jones et al.**, 2000; **Falci et al.**, 2000) are restricted to Abelian holonomies only, which due to adiabatic conditions, have the disadvantage of being too slow if compared with typical dynamical time-scales, making it very difficult for any realistic realisation of quantum computation.

A leap has been taken towards the implementation of holonomic quantum computation. The adiabaticity difficulty has been overcome in (**Duan et al.**, 2001; **Xiang-Bin & Keiji**, 2001; **Xiang-Bin et al.**, 2001),

by using non-Abelian holonomies to perform geometric quantum gates in a set of trapped ions (Duan *et al.*, 2001), and in an NMR system (Xiang-Bin & Keiji, 2001; Xiang-Bin *et al.*, 2001). The use of *non-adiabatic* state evolution implies two main differences from what was said for the Abelian Berry phase: i) After a time $t = \tau$, the state vector evolution is *non-cyclic*, and ii) The geometric phase Γ acquired over the period τ is different from the one found for the adiabatic evolution, $\Gamma \neq -\pi(1 - \cos\theta) = \gamma$. Details concerning these new results, and the way they can be used to perform conditional quantum dynamics (e.g., the controlled phase shift gate) can be found in (Duan *et al.*, 2001; Xiang-Bin & Keiji, 2001; Xiang-Bin *et al.*, 2001). As a bottom line, any scheme attempting to perform quantum computation using only geometric phases has to *eliminate the dynamic phase*. In NMR this can be done by using a refocussing technique known as spin-echo (Ekert *et al.*, 2000(A); Jones *et al.*, 2000).

Regarding the robustness of the geometric QC to errors, and the way decoherence may affect the geometric phases during the quantum computation, the following results are in order. By means of a quantum-jump approach, Carollo *et al.* (Carollo *et al.*, 2003) have calculated the geometric phase associated with the evolution of a system subjected to decoherence. They considered dephasing and spontaneous decay as the two main sources of decoherence, and showed that the geometric phase is completely insensitive to the number of jumps determined by the dephasing operator; that is, insensitive to dephasing. By using the same approach, Carollo *et al.* (Carollo *et al.*, 2004) have also calculated the geometric phase of a spin-1/2 system driven by one and two mode quantum fields subject to decoherence: they have shown that the corrections to the phase in the no-jump trajectory are different when considering adiabatic and nonadiabatic evolutions. Finally, it has also been shown in (Carollo *et al.*, 2006) that in the limit of a strongly interacting environment a system initially prepared in a decoherence-free subspace (DFS) coherently evolves in time, adiabatically following the changes of the DFS. If the reservoir cyclicly evolves in time, the DFS states acquire a holonomy.

So far, there has been an experimental demonstration of the two-qubit gate $B(\varphi)$ in an NMR setup (Jones *et al.*, 2000), and some other physical implementations in systems such as trapped ions (Blatt & Wineland, 2008), quantum dots (Fushman *et al.*, 2008; Robledo *et al.*, 2008), Josephson junctions (Clarke & Wilhelm, 2008), and other solid-state setups.

III. QUANTUM ENTANGLEMENT: A COMMUNICATION RESOURCE

Entanglement is a central concept in quantum information theory. In a system consisting of n quantum subsystems, it shows a form of correlations between such subsystems that cannot be understood or explained in any “classical” fashion because it points out exactly what distinguishes the quantum from the classical world. These correlations imply that each subsystem carries some knowledge, some degree of information, about the other parts. This degree of knowledge can be quantified, as is shown below. This section introduces the basic elements and definitions that are used to characterise the degree of entanglement of a given quantum system. A detailed review of the current developments regarding the subject of entanglement can be found in (Horodecki *et al.*, 2001; Plenio & Virmani, 2007; Horodecki *et al.*, 2007; Amico *et al.*, 2008; Vedral, 2008).

A. Quantifying quantum entanglement

It is well known how to quantify entanglement in the case of a bipartite system (a system consisting of two subsystems, namely A and B) in a total pure state. For more than two subsystems, or mixed states, the situation is not so clear (for a survey of recent developments see, e.g., (Horodecki *et al.*, 2001; Plenio & Virmani, 2007; Horodecki *et al.*, 2007; Amico *et al.*, 2008)). Next, the basic tools and definitions are given. Consider a bipartite system composed of subsystems A, and B. The state vector for this system is in the finite dimensional Hilbert space $\mathcal{H}_{AB} = \mathcal{H}_A \otimes \mathcal{H}_B$. This is to be referred to as an $n \otimes m$ system, where n and m are the dimensions of the spaces \mathcal{H}_A and \mathcal{H}_B respectively. A general *pure* state of the system can be written as

$$|\Psi\rangle_{AB} = \sum_{i,j} c_{ij} |i\rangle_A \otimes |j\rangle_B, \quad (19)$$

where $\{|i\rangle_A\}$, and $\{|j\rangle_B\}$ are a complete orthonormal basis set for each subsystem.

Theorem (Schmidt decomposition): For any given pure state $|\Psi\rangle_{AB}$ it is always possible to find a complete set of orthonormal vectors $\{|n\rangle_A\}$, and $\{|\tilde{n}\rangle_B\}$, in spaces \mathcal{H}_A and \mathcal{H}_B such that

$$|\Psi\rangle_{AB} = \sum_{n=1}^k \alpha_n |n\rangle_A \otimes |\tilde{n}\rangle_B, \quad (20)$$

where the coefficients $\alpha_n > 0$, and $k \leq \dim \mathcal{H}_{AB}$. Eq. (20) is called the Schmidt decomposition of $|\Psi\rangle_{AB}$.

Note that this decomposition contains only one index, in contrast to Eq. (19). The proof of this theorem is almost straightforward (see, e.g., (Peres, 1993)). Note: i) There is no Schmidt decomposition for a system of more than two subsystems. ii) A bipartite pure state is said to be *entangled* if at least two coefficients of the α_n 's do not vanish (the number of non-vanishing coefficients is called the Schmidt number of $|\Psi\rangle_{AB}$)⁶.

Degrees of entanglement: The entanglement of a given quantum state can be defined in terms of the concept of separability: if a given state does not satisfy the separability criterion, then the state is said to be entangled. However, it is not so easy to find a unique separability criterion that solves the problem of determining with certainty whether a given quantum state is entangled or not. In fact, this question has led to a very active field of research: manipulation of entanglement, where quantifying, concentrating and distilling entanglement, and using mixed-state entanglement as a resource for quantum communication are central subjects (Horodecki *et al.*, 2001; Plenio & Virmani, 2007; Horodecki *et al.*, 2007; Amico *et al.*, 2008). One separability criterion is based on the violation of Bell inequalities (Werner, 1989), where separable states are required to satisfy all Bell inequalities (Werner, 1989). However, this is not a very strong criterion since there are some entangled states that also satisfy all standard Bell inequalities (Popescu, 1994; Popescu, 1995; Zukowski *et al.*, 1998). A stronger and more useful criterion is based on the concept of partial transposition of Peres (Peres, 1996; Peres, 1999), in which he noted that a separable state remains a positive operator if subjected to partial transposition. For a detailed discussion of these criteria, see, e.g., (Horodecki *et al.*, 2007; Amico *et al.*, 2008) and references therein. Here, it is necessary to introduce some definitions concerning the degree of entanglement of a given quantum system. It follows from the Schmidt theorem that for a bipartite system (each subsystem having a two-dimensional Hilbert space)

$$|\Psi\rangle_{AB} = \alpha|0\rangle_A|0\rangle_B + \beta|1\rangle_A|1\rangle_B . \quad (22)$$

⁶ In a bipartite system, subsystems A and B are described by density operators ρ_A and ρ_B . It turns out that these operators have the same non-vanishing eigenvalues: they are equal to the square of the Schmidt numbers. A state acting on Hilbert space \mathcal{H}_{AB} is called *separable* (Horodecki *et al.*, 2001) if it is of the form

$$\rho = \sum_{i=1}^k c_i \rho_i^A \otimes \rho_i^B , \quad (21)$$

for some k , where ρ_i^A and ρ_i^B are states on \mathcal{H}_A and \mathcal{H}_B respectively. If ρ is a *pure* state, i.e., $\rho = |\Psi_{AB}\rangle\langle\Psi_{AB}|$, then it is easy to see whether is entangled or not: indeed, it is separable if and only if $|\Psi\rangle_{AB} = |\Psi\rangle_A \otimes |\Psi\rangle_B$.

Suppose that any present phase is absorbed by the Schmidt vectors, such that we can define $\alpha, \beta \in \mathbf{R}$, with $|\alpha| \leq |\beta|$. Then, the following terminology is introduced:

Product state: A state is a product state if and only if $\alpha = 0$.

Entangled state: A state is entangled if and only if $\alpha \neq 0$.

Maximally entangled state: A state is maximally entangled if and only if $|\alpha| = |\beta|$.

The most famous entangled states are the maximally entangled states $|\phi^\pm\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle|0\rangle \pm |1\rangle|1\rangle)$, and $|\psi^\pm\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle|1\rangle \pm |1\rangle|0\rangle)$. These four mutually orthogonal states are so important because they exhibit the strongest possible Bell-EPR correlations (Peres, 1993; Braunstein *et al.*, 1992), the reason they are known as the Bell-basis states. Also, as will be seen below, these states are crucial to many communication protocols. It was shown in Section II that these entangled states can be generated and manipulated in terms of universal quantum logic gates: suppose, for example, that a two qubit state is initialised in the state $|\Psi_0\rangle = |0\rangle|0\rangle$. Then, by applying the two successive quantum gates $\text{CNOT}_{12}H_1$ to $|\Psi_0\rangle$, the Bell state $|\phi^+\rangle$ is generated (the same sort of unitary transformations can be applied to n -qubit systems in order to generate, for example, ‘‘Schrödinger cat states’’-like). In (Quiroga & Johnson, 1999; Reina *et al.*, 2000(B)), a solid-state based setup for producing maximally entangled states of the Bell and Greenberger-Horne-Zeilinger type is proposed; also, in (Reina & Johnson, 2000(D)), a quantum teleportation protocol of quantum dot excitonic states has been proposed. It is interesting that once $|\phi^+\rangle$ has been generated, the remaining states of the Bell basis can be also generated by applying *only* single qubit gates to it.

B. Entanglement measures

Two main questions are: Given an arbitrary state, can we decide whether it is entangled? Given two quantum states, can we decide which of them has more entanglement?

As discussed above, the first question was partially solved initially by Peres (Peres, 1996) and refined by the Horodeckis (Horodecki *et al.*, 1996): Peres observed that if a matrix is entangled, it remains positive after being partially transposed; subsequently, the Horodeckis limited the criteria to the 2×2 and 2×3 case. For higher dimensions, the problem remains open (Horodecki *et al.*, 2007; Amico *et al.*, 2008). The recognition of the partial transpose positivity property would later lead to

an important measure of entanglement called *Negativity* (Vidal & Werner, 2002). Later, the formalism of entanglement witnesses appeared (Terhal, 2000), based on the structure of the density matrix space. This formalism is of particular interest because it relies on operators called “witnesses of entanglement” which take negative expectation values whenever the state is entangled and with positive values on separable states. They are, however, not effective as quantifiers of entanglement.

The second question, as to how to quantify entanglement, is also quite an involved one, and it has been the object of extensive research over the past decade. We now give a brief review of several strategies that have been adopted towards its solution. One could try to solve this problem by using a particular protocol and measuring the entanglement of the chosen state by the success of the involved protocol or task. However, using this method, different protocols would yield different hierarchies of states, hence a different strategy should be adopted.

The observation that local operations and classical communication (LOCC) don’t create entanglement suggests that if a state A can be transformed to B by LOCC then A is at least as entangled as B. This leads to a natural hierarchy of entangled states in the bipartite (two qubits) case in the form of the majorization process (Nielsen & Kempe, 2001). However, in the qudit case, or the multipartite (many qudits) case, one faces difficulties because of the existence of incomparable states, namely states which cannot be transformed into each other by LOCC means. These limitations can in principle be overcome in the asymptotic limit where many copies are used (Popescu & Rohrlich, 1997), or even when the transformation among states is not required to be fully certain (SLOCC) (Bennett, et al., 2001; Dür, et al., 2000). However, establishing a hierarchy gets very complicated even in low dimensional cases. Despite this, the LOCC hierarchy discussion has raised several measures of entanglement, such as the distillable entanglement (Rains, 1999; Bennett, et al., 1996), the entanglement cost (Hayden, et al., 2001), and the entanglement of formation (Bennett, et al., 1996).

Plenio and Virmani (Plenio & Virmani, 2007) have proposed an axiomatic approach to entanglement. They established the conditions that a quantity should exhibit in order to quantify entanglement, which must be satisfied even if one chooses to measure entanglement in a “protocol-based” fashion (Horodecki et al., 2007; Amico et al., 2008). This axiomatic approach is convenient as it not only incorporates the operational approach to entanglement, but goes further, avoiding the incomparability limitations, and even set bounds for them. Such basic conditions are (Plenio & Virmani, 2007)

§ *There are states with no entanglement.*—Separable states, i.e., states that can be written as

$$|\Psi\rangle_{1,\dots,N} = \sum p_i |\psi\rangle_1^i \otimes \dots \otimes |\psi\rangle_N^i, \quad (23)$$

have no entanglement. This is so because these states can be created by local operations and classical communications, namely they are classically correlated states which do not violate any Bell inequality.

§ *Non-separable states are entangled.*—Essentially this means that for any non-separable state there is a protocol in which the states outperform a separable state.

§ *Entanglement cannot increase under Local Operations and Classical Communications.*—This follows from Bennett’s observation (Bennett & DiVincenzo, 2000): entangled states are those which can perform tasks that states generated by local operations and classical communications cannot; thus, LOCC cannot create entanglement because it would imply that LOCC could be used to perform the above mentioned tasks. Mathematically, this means that given a measure of entanglement \mathcal{X} ,

$$\mathcal{X}(\rho) \geq \sum p_i \mathcal{X} \left(\frac{M_i \rho M_i^\dagger}{p_i} \right), \quad (24)$$

where $\sum M_i M_i^\dagger = 1$ and $p_i = \text{Tr}[M_i \rho M_i^\dagger]$. In the bipartite qubit case, LOCC establishes a full hierarchy in this sense: if a state can be transformed into another by LOCC then it is at least as entangled as the other one. The general qudit and/or multipartite case has some subtleties, as there are states which cannot be transformed into each other by LOCC operations with certainty, and thus, are incomparable using this criteria. However, this condition must still be satisfied. This is, in general, the most difficult property to test, although there are some simplifications (Vidal, 2000; Horodecki, 2005).

§ *Entanglement is invariant under Local Unitary (LU) operations.*—This reflects the freedom in the choice of basis for every subsystem, entanglement is independent of that choice and thus any measure of entanglement should also satisfy this invariance condition. Also, as local unitaries are invertible then, by the LOCC condition, both states must have the same entanglement.

§ *Maximally entangled states exist.*—This follows, as it can be shown that an arbitrary two-qubit state can be built by LOCC from an EPR pair (Bennett, et al., 1996). In the qudit/multipartite case, there is no notion of a unique maximally entangled state in the

LOCC sense, because of the existence of incomparable states, as discussed above; however Bell inequalities multipartite generalizations, such as the one by Greenberger, Horne, and Zeilinger (**Greenberger, et al.**, 1989), lead to the notion of maximal multipartite entanglement and generalize the EPR pair to higher numbers of qubits.

A quantity satisfying the above-mentioned conditions is called an *entanglement monotone*. There are some other properties which can be demanded of entanglement monotones when thinking in terms of axiomatic measures, i.e., when obtaining the optimal conditions for an entanglement measure. We give some of them that are of relevance to the entanglement monotones proposed in Paz-Silva and Reina (**Paz-Silva & Reina**, 2008; **Paz-Silva & Reina**, 2009).

[ADD] *Additivity*. Given two arbitrary states denoted by ρ_A and ρ_B ,

$$\mathcal{X}(\rho_A \otimes \rho_B) = \mathcal{X}(\rho_A) + \mathcal{X}(\rho_B). \quad (25)$$

[SSA] *Strong super additivity*. Given a generic N -partite state $\rho^{1,\dots,N}$,

$$\mathcal{X}(\rho^{1,\dots,N}) \geq \mathcal{X}(\rho^{1,\dots,m}) + \mathcal{X}(\rho^{m+1,\dots,N}). \quad (26)$$

[CONT] *Asymptotic continuity*. There are $c, c' \geq 0$ such that for all ρ, σ with $\delta(\rho, \sigma) \leq \epsilon$

$$|\mathcal{X}(\rho) - \mathcal{X}(\sigma)| \leq c\epsilon \log d + c'. \quad (27)$$

Another multipartite entanglement measure formulated from pure geometric considerations has been proposed in (**Paz-Silva & Reina**, 2007).

C. Examples

We now review some measures of entanglement which have been extensively used and which are of great value because of their implications, properties and relation to quantum information.

Entanglement of Formation (EoF).— This is the most cited and prominent measure of entanglement, since for the bi-partite scenario it allows an exact, ambiguity free, analytical expression. It is defined as

$$\mathcal{E}_F^b(\rho_{AB}) = \min \sum p_i \mathcal{E}^b(\rho_i), \quad (28)$$

$\mathcal{E}^b(\rho_{AB}) = S(\text{Tr}_B[\rho_{AB}]) = -\text{Tr}_B[\rho_{AB}] \log[\text{Tr}_B[\rho_{AB}]]$, and the minimization is intended over pure state decompositions (pure-convex-roof (**Uhlmann**, 1998)). Further, note that it can be rewritten as

$$\mathcal{E}_F^b(\rho_{AB}) = \min \sum p_i \frac{1}{2} I(\rho_A^i : \rho_B^i), \quad (29)$$

where $I(\rho_A : \rho_B)$ is the quantum mutual information (**Cerf & Adami**, 1997). Although the minimization is, in general, non-trivial, it has an analytic solution for the two-qubit case (**Wooters**, 1998).

Consider, in decreasing order, the eigenvalues λ_i of the matrix $\sqrt{\rho_{AB} \tilde{\rho}_{AB}}$, where $\tilde{\rho}_{AB} = (\sigma_y \otimes \sigma_y) \bar{\rho}_{AB} (\sigma_y \otimes \sigma_y)$, $\bar{\rho}_{AB}$ is the elementwise complex conjugate of ρ , and σ_y is the Pauli matrix. The Concurrence is defined as $C(\rho_{AB}) = \max\{0, \lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3 - \lambda_4\}$, and hence the EoF reads

$$\mathcal{E}_F^b(\rho_{AB}) = -\frac{1 + \sqrt{1 - C^2}}{2} \log_2 \frac{1 + \sqrt{1 - C^2}}{2} - \frac{1 - \sqrt{1 - C^2}}{2} \log_2 \frac{1 - \sqrt{1 - C^2}}{2}. \quad (30)$$

The general multipartite EoF is currently conjectured to be additive, but a formal proof of it has, so far, been elusive (**Bennett, et al.**, 1997; **Shor**, 2002; **Shor**, 2004).

As pointed out in (**Plenio & Virmani**, 2007), due to the fact that the two-qubit $\mathcal{E}_F^b(\rho)$ and the two-qubit Concurrence $C(\rho)$ are monotonically related, some authors prefer to characterise entanglement using only the Concurrence (instead of $\mathcal{E}_F^b(\rho)$). This said, it should be stressed that it is only the entanglement of formation that is an entanglement measure, and the Concurrence gets its meaning via its relation to the EoF, and not the other way around.

Squashed entanglement.— It is defined as (**Christandl & Winter**, 2004)

$$E_{sq} := \inf \left[\frac{1}{2} I(\rho^{ABE} : \text{Tr}[\rho^{ABE}] = \rho^{AB}) \right], \quad (31)$$

where $I(\rho^{ABE}) = S(\rho^{AE}) + S(\rho^{BE}) - S(\rho^{ABE}) - S(\rho^E)$ is the quantum conditional mutual information, which essentially measures how correlated two parties are, according to a third one. This measure is important because it was the first additive entanglement measure, bounded by the entanglement of formation and the distillable entanglement.

Relative entropy of entanglement.— Defined as (**Vedral & Plenio**, 1998)

$$E_R^X(\rho) = \inf_{\sigma \in X} S(\rho || \sigma), \quad (32)$$

where X is a set of states, usually the set of separable states, distillable states, or positive partial transposed states, chosen according to the definition of separable states, such that LOCC maps X into X . It is not an additive quantity.

For other entanglement measures and a more detailed treatment of entanglement quantification, the reader is referred to (Plenio & Virmani, 2007; Horodecki *et al.*, 2007; Amico *et al.*, 2008).

As we mentioned before, the LOCC constraint is very strong in the bi-partite case. In the multipartite case, however, there are complications. The main issue is the existence of non LOCC-interconvertible states, which implies the existence of incomparable states and thus the impossibility of applying the LOCC constraint to obtain a hierarchy. The LOCC non-increasing condition must still hold for any measure of entanglement. This complication is strongly related to the issue of having many elements which can be entangled in different ways. For instance, in the four qubit case we can have an

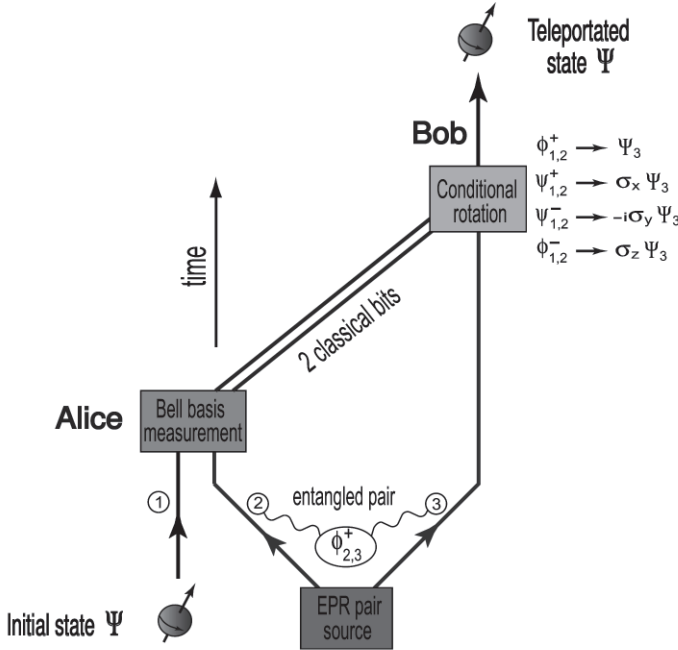


FIG. 5 Schematics of the quantum teleportation process. For simplicity the kets notation for the quantum states associated with the 3-particle system has been omitted (see text).

$|\Omega\rangle = |\phi^+\rangle_{12} \otimes |\phi^+\rangle_{34}$ state, which cannot be LOCC compared to a GHZ state, say $|\psi_{GHZ}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0000\rangle + |1111\rangle)$, and thus the problem of characterizing its entanglement arises. Here, the axiomatic approach is valuable, as we can build a quantity characterizing the entanglement of a system. This liberty, however, implies that different monotones may manifest different hierarchies, which, in turn, means that each monotone characterizes a different type of entanglement (Plenio & Virmani, 2007). Of course, the more properties we require will narrow our search space further.

A study of non-equilibrium multipartite entanglement dynamics in an externally driven Dicke model has been reported in (Bastidas *et al.*, 2009). This has been done for the driven single-mode Dicke model in the thermodynamic limit, when the field is in resonance with the atoms. There, the correlations for the atoms-field ground state, and the linear entropy have been analytically calculated as entanglement quantifiers. A strong relation between the stability of the dynamical parameters and the reported entanglement has been found in (Bastidas *et al.*, 2009).

Now that the basic framework to entanglement quantification has been introduced, we discuss the main practical applications of entanglement as a *communication resource*.

D. Quantum teleportation

This is arguably the most striking application of quantum entanglement. Here, the quantum state $|\Psi\rangle$ of a system can be transmitted from one spatial location to another with neither physical transportation of the system itself nor previous knowledge of $|\Psi\rangle$. This apparently impossible task invokes only the use of a two-particle maximally entangled state (e.g., $|\phi^+\rangle$)⁷— that has to be shared beforehand between the two parties that wish to transmit $|\Psi\rangle$ — assisted by the communication of two classical bits of information. The details of the whole teleportation protocol, as originally formulated in (Bennett *et al.*, 1993), are given below. This is perhaps the most evident of the demonstrations of quantum entanglement as a *resource* for the transmission of quantum information. In (Reina & Johnson, 2000(D)), a prescription for the teleportation of excitonic states in a quantum dot molecule, and the generalization of the original protocol in terms of using an N -partite Schrödinger cat state has been reported.

The protocol that performs the teleportation process is sketched in Fig. 5. In this scenario, the “arrow of time” indicates how to carry out the protocol:

- (t_0) At $t = t_0$ the EPR source prepares *one* of the *entangled* states of the Bell basis $\mathcal{B}_B = \{|\phi^+\rangle, |\phi^-\rangle, |\psi^+\rangle, |\psi^-\rangle\}$ between particles 2 and 3, let's say, the state $|\phi^+\rangle_{2,3}$.
- (t_1) At $t = t_1$ Alice sends the particle 3 of the EPR-pair to Bob, and unites the other particle of the entangled pair with the unknown qubit state $|\Psi\rangle_1 \equiv \alpha|0\rangle_1 + \beta|1\rangle_1$ ($|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$) that she wants to transmit to Bob. After this, she performs a Bell measurement on the (uncorrelated) particles 1 and 2, which projects onto one of the states of the \mathcal{B}_B -basis (see Fig. 5). As this stage, the whole system's state can be written as follows:

$$|\Psi\rangle_1|\phi^+\rangle_{2,3} = \frac{1}{2} \left[|\phi^+\rangle_{1,2}(\alpha|0\rangle_3 + \beta|1\rangle_3) + |\psi^+\rangle_{1,2}(\alpha|1\rangle_3 + \beta|0\rangle_3) + |\psi^-\rangle_{1,2}(\alpha|1\rangle_3 - \beta|0\rangle_3) + |\phi^-\rangle_{1,2}(\alpha|0\rangle_3 - \beta|1\rangle_3) \right]. \quad (35)$$

(t_2) Next, Alice sends the result of her measurement, two classical bits of information, to Bob via a classical channel. These classical bits are represented by two straight lines in Fig. 5. Eq. (35) can then be rewritten as

$$|\Psi\rangle_1|\phi^+\rangle_{2,3} = \frac{1}{2} \left[|\phi^+\rangle_{1,2}|\Psi\rangle_3 + |\psi^+\rangle_{1,2}(\sigma_x)|\Psi\rangle_3 + |\psi^-\rangle_{1,2}(-i\sigma_y)|\Psi\rangle_3 + |\phi^-\rangle_{1,2}(\sigma_z)|\Psi\rangle_3 \right], \quad (36)$$

where the σ_i operators are the Pauli matrices in the $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ basis⁸.

(t_3) After receiving Alice's classical information, Bob performs one of the following unitary operations [see Eq. (37)] in order to transform the state of his particle⁹ into $|\Psi\rangle$:

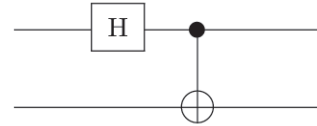
$$\begin{aligned} |\phi^+\rangle_{1,2} &\longrightarrow I && \text{(do nothing) ,} \\ |\psi^+\rangle_{1,2} &\longrightarrow \sigma_x && \text{(do bit flip) ,} \\ |\psi^-\rangle_{1,2} &\longrightarrow \sigma_x \sigma_z && \text{(do bit- and phase-flip) ,} \\ |\phi^-\rangle_{1,2} &\longrightarrow \sigma_z && \text{(do phase flip) .} \end{aligned} \quad (37)$$

Hence, Bob only needs to apply one of the unitary transformations of Eq. (37), conditional on the outcome of Alice's measurement, in order to obtain the initial state $|\Psi\rangle$ of particle 1 on his qubit (particle 3). Thus, the process works without actual physical transportation nor previous knowledge of the state $|\Psi\rangle$. A few remarks regarding this teleportation process: i) The Bell measurement establishes a correlation between the two initially uncorrelated particles 1 and 2. The outcome of this measurement is completely random, as can be seen from Eq. (37). ii) The protocol is consistent with the no-cloning theorem, since the "copy" of the state $|\Psi\rangle$ obtained by Bob requires the previous Bell basis measurement of particles 1 and 2 which destroys the original state $|\Psi\rangle_1$. iii) Since Bob has to wait for a classical signal to be sent to him in order to perform the quantum state transmission, the process has not been accomplished faster than light.

Teleportation as a quantum circuit

Next, it is shown that the above quantum teleportation protocol can be described in terms of elementary gates for quantum computation. In order to implement the quantum operations needed for the description of the practical teleportation scheme proposed here, two elements are employed: i) the Hadamard gate H, and ii) the CNOT (measurement) gate. As explained in Section II, in the language of quantum circuits, qubits are denoted by horizontal lines ("wires"), and the above-mentioned gates are schematically represented as in Fig. (1), where the basis states $i, j = 0$ or 1 . In addition, if the above set of gates is to be used for universal quantum computation, another single qubit gate, the *phase shift* $P(\varphi)$ gate must be introduced. This transforms: $|0\rangle \mapsto |0\rangle$, and $|1\rangle \mapsto e^{i\varphi}|1\rangle$, and is denoted as $|x\rangle \xrightarrow{\varphi} e^{ix\varphi}|x\rangle$. The Hadamard and phase gates are sufficient to construct *any* unitary operation on a single qubit. Consequently, the Hadamard transform, all phase gates, together with the CNOT gate form an *universal* set of logic gates, i.e., any given n -qubit unitary transformation required in a certain quantum computation scheme can be exactly simulated with these gates (**Barenco, et al., 1995(A)**). A pure state $|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, where $\alpha, \beta \in \mathbf{C}$, and $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ is also introduced in this Hilbert space. The circuit notation is now used in order to provide a description of the quantum teleportation phenomenon in terms of quantum computation.

The *unitarity* of the Hadamard and the CNOT gates has interesting implications: consider the action of the following (Bell) circuit



This transforms the states of the (disentangled) computational basis of two qubits \mathcal{B}_2 into a set of maximally entangled states. This set is exactly the so-called Bell basis and, as we saw previously, is of fundamental relevance to quantum teleportation. As a result of the two-qubit register transformations of the circuit, we are left with the states:

$$|00\rangle \mapsto \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) \equiv |\phi^+\rangle, \quad (38)$$

$$|01\rangle \mapsto \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle) \equiv |\psi^+\rangle, \quad (39)$$

$$|10\rangle \mapsto \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |11\rangle) \equiv |\phi^-\rangle, \quad (40)$$

$$|11\rangle \mapsto \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle) \equiv |\psi^-\rangle. \quad (41)$$

⁸ Recall that $\sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$, $\sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$, $\sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$.

⁹ Note that originally ($t = t_0$), Bob's particle 3 was *maximally* entangled with particle 2.

Since the Hadamard transform is just a single qubit gate, it is obvious that the CNOT gate is the one responsible for the generation of the *entangled* basis $\mathcal{B}_B = \{|\phi^\pm\rangle, |\psi^\pm\rangle\}$. Interestingly, the same CNOT gate can be used to disentangle the Bell basis states: just apply the circuit $\text{CNOT}_{12}H_1$ to the \mathcal{B}_B -basis states and you shall end up with the disentangled basis \mathcal{B}_2 ! As discussed in Sec. II, this is because of the reversibility of this entangling gate. In an n -qubit register, the Schrödinger's cat state $|\Psi_{\text{N-CAT}}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\dots 0\rangle_{1,\dots,n} + |11\dots 1\rangle_{1,\dots,n})$ can be produced, for example, starting from the trivial input state $|00\dots 0\rangle_{1,\dots,n}$, and then applying a sequence of $n+1$ CNOT gates (**Reina & Johnson, 2000(D)**).

Figure 6(a) shows the computational approach, which is based on the work reported in (**Brassard et al., 1998**). As usual, two parties are referred to, Alice and Bob. Alice wants to teleport an arbitrary, unknown qubit state $|\Psi\rangle$ to Bob. Alice prepares two qubits in the state $|0\rangle$ and then gives the state $|\Psi 00\rangle$, as the *input* to the system. By performing the series of transformations shown in Fig. 6(a), Bob receives as the *output* of the circuit the state $\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_a + |1\rangle_a)\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_b + |1\rangle_b)|\Psi\rangle_c$. This circuit by itself is not a quantum teleportation machine, we next show how to transform it into a quantum teleportation device.

The circuit shown in Fig. 6(a) comprises the teleportation protocol given above. As before, this uses three qubits. The unitary transformations that are applied during the computation process in Fig. 6(a) (from left to right) are:

(t_1) Preparation of the input state: this is initialized as the direct product of the unknown state to be teleported, $|\Psi\rangle_1 = \alpha|0\rangle_1 + \beta|1\rangle_1$, and the basis state of qubits 2, and 3, $|00\rangle_{23}$.

(t_2) Realization of the first two quantum gates gives

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{2}}(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle)(|00\rangle + |11\rangle) = & \quad (42) \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(\alpha|000\rangle + \alpha|011\rangle + \beta|100\rangle + \beta|111\rangle) \end{aligned}$$

(t_3) The CNOT_{12} gate produces

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(\alpha|000\rangle + \alpha|011\rangle + \beta|110\rangle + \beta|101\rangle) \quad (43)$$

(t_4) After the Hadamard transform H_1 one gets

$$\begin{aligned} \frac{\alpha}{2}\{ |000\rangle + |100\rangle + \alpha|011\rangle + \alpha|111\rangle \} + & \quad (44) \\ \frac{\beta}{2}\{ |010\rangle - |110\rangle + |001\rangle - |101\rangle \} , \end{aligned}$$

which can be rewritten as

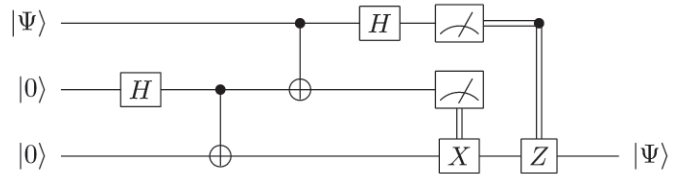
$$\begin{aligned} \frac{1}{2}\{ |00\rangle(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) + |01\rangle(\alpha|1\rangle + \beta|0\rangle) + & \quad (45) \\ |10\rangle(\alpha|0\rangle - \beta|1\rangle) + |11\rangle(\alpha|1\rangle - \beta|0\rangle) \} = \\ \frac{1}{2}\{ |00\rangle|\psi\rangle + |01\rangle\hat{\sigma}_x|\psi\rangle + |10\rangle\hat{\sigma}_z|\psi\rangle + |11\rangle(-i\sigma_y)|\psi\rangle \} \end{aligned}$$

and we are done, since now we only need to make a measurement in the computational basis over qubits 1 and 2 (at the dashed line) and the outcome will reveal the transformation that Bob needs to perform over qubit 3 in order to obtain the desired quantum state $|\psi\rangle$. Note that for the circuit to work as a teleportation device: i) two bits of classical information have to be transmitted from Alice to Bob, and ii) we have used the computational basis \mathcal{B}_2 which can be significantly easier to realise in the laboratory than the Bell basis originally used in (**Bennett et al., 1993**).

(t_5) If we were to perform the second part of the circuit (after the dashed line) the final result or outcome of the computation is given at the right hand-side of Fig. 6(a). This process, however, can be simplified if we notice that after Alice's measurement (at the dashed line), the four possible outcomes (left-hand side of Eq. (46)) explicitly indicate the route of action to be followed by Bob over his qubit (right-hand side of Eq. (46)) in order to recover Alice's original quantum state:

$$\begin{aligned} |00\rangle & \mapsto \hat{\mathbb{I}}(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) = |\Psi\rangle_3 \\ |01\rangle & \mapsto \hat{\sigma}_x(\alpha|1\rangle + \beta|0\rangle) = |\Psi\rangle_3 \\ |10\rangle & \mapsto \hat{\sigma}_z(\alpha|0\rangle - \beta|1\rangle) = |\Psi\rangle_3 \\ |11\rangle & \mapsto \hat{\sigma}_z\hat{\sigma}_x(\alpha|1\rangle - \beta|0\rangle) = |\Psi\rangle_3 \end{aligned} \quad (46)$$

This process can be summarised, in the language of quantum circuits, as shown below. Each 'detector box' and double line means, respectively, the measurement and communication of one bit of information:



In Fig. 6(b), the analysis of the teleportation process is extended to the case of a four qubit circuit (**Reina & Johnson, 2000(D)**). As before, Alice wants to teleport the state $|\Psi\rangle_1$ to Bob. She prepares three qubits in the state $|0\rangle$ and gives the state $|\Psi 000\rangle$ as the input to the system. From Fig. 6(b) it is clear that the function of the first three gates performed by Alice is to obtain the maximally entangled GHZ state $|\Psi_{\text{GHZ}}\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}(|000\rangle +$

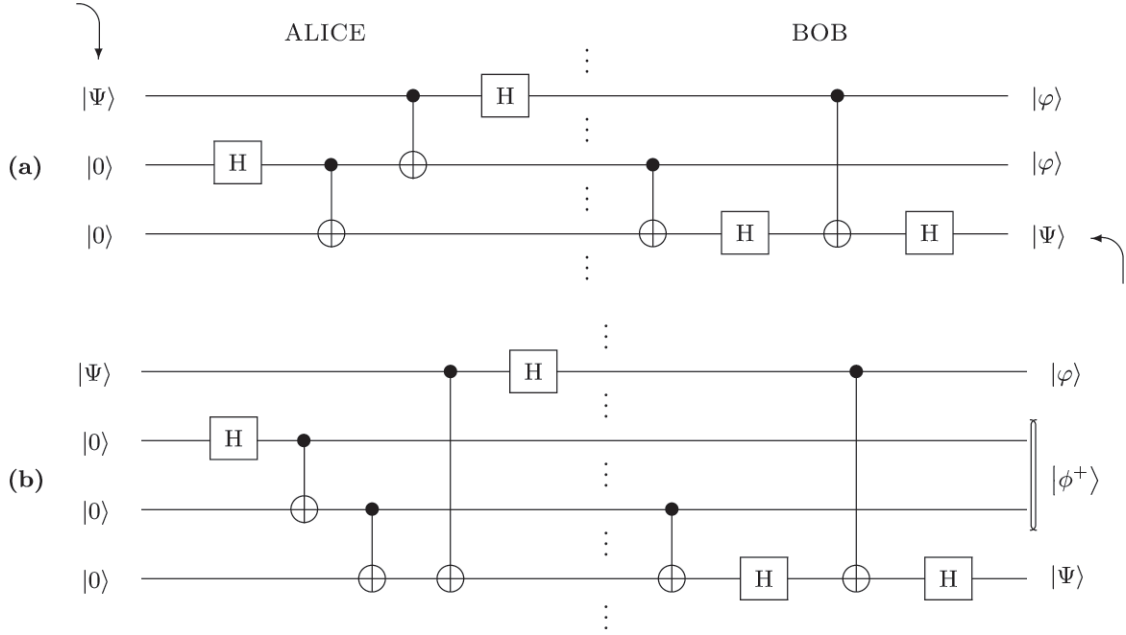


FIG. 6 Circuit schemes to teleport an unknown quantum state from Alice to Bob using an arrangement of (a) 3, and (b) 4 qubits. The method employs (a) Bell, and (b) GHZ states respectively.

$|111\rangle$) (Greenberger *et al.*, 1989). The next two gates realised by Alice (before the dotted line in Fig. 6(b)) leave the system in the state

$$\frac{1}{2} \left\{ |000\rangle(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) + |011\rangle(\beta|0\rangle + \alpha|1\rangle) + |100\rangle(\alpha|0\rangle - \beta|1\rangle) + |111\rangle(-\beta|0\rangle + \alpha|1\rangle) \right\}. \quad (47)$$

By performing the operations shown after the dotted line in Fig. 6(b), Bob gets as the output of the circuit the state $\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1 + |1\rangle_1)|\phi^+\rangle_{2,3}|\Psi\rangle_4$. Again, for this to work as a teleportation circuit, we notice from Eq. (47) that a measurement (in the computational basis) of qubits 1 and 2 and its communication to Bob, who then realises a unitary transformation over qubit 4 (as detailed for the circuit of Fig. 6(a)), completes the process. A generalisation to the case of an n -QTC using Schrödinger's cat states is given in (Reina & Johnson, 2000(D)).

After the seminal work of (Bennett *et al.*, 1993), some remarkable experimental demonstrations of teleportation have been achieved. The first one (Bouwmeester *et al.*, 1997), teleported the polarization state of a photon by using an additional pair of entangled photons. Here, the measurement process explained above took place in such a way that the second photon (that of Bob) of the entangled pair acquired the polarization of the initial photon (that of Alice). The deterministic teleportation of a quantum state between two single material particles

(trapped ions or atomic qubits) has now also been achieved (Riebe *et al.*, 2004; Barrett *et al.*, 2004). Remarkably, also the experimental quantum teleportation of a two-qubit composite system has been achieved (Zhang *et al.*, 2006).

The experimental teleportation between objects of a different nature—light and matter, which respectively represent flying and stationary media has also been reported (Chen *et al.*, 2008; Sherson *et al.*, 2006). In (Sherson *et al.*, 2006), a quantum state encoded in a light pulse is teleported onto a macroscopic object (an atomic ensemble of caesium atoms). Here, the authors point out that the use of a macroscopic atomic ensemble is relevant for the practical implementation of a quantum repeater. It is well known that an important factor for the implementation of quantum networks is that the teleportation between transmitter and receiver can be carried out over long distances. In this experiment, the distance achieved was 0.5 metres. The authors claim that their approach should be scalable to longer distances since their experiment uses propagating light to achieve the entanglement of light and atoms. In a more recent experiment, (Chen *et al.*, 2008) have achieved, following the spirit of the teleportation between light and matter states, a memory-built-in teleportation between photonic (flying) and atomic (stationary) qubits. They succeeded in teleporting an unknown polarization state of a single

photon over a distance of 7 metres onto a remote atomic qubit that also served as a readable quantum memory. Interestingly, the teleported state was stored and successfully read out for up to 8 μ s. As pointed out in (Chen *et al.*, 2008), the combination of quantum teleportation and quantum memory of photonic qubits paves the road for future implementations of large-scale quantum communication, and measurement-based quantum computation.

E. Dense coding

Classical information can be transmitted by means of a quantum channel, i.e., via the use of qubits. In principle, the task is very simple: if a sender, Alice, wants to transmit a classical binary string, say 0110, to a physically distant receiver Bob, via quantum means, she simply prepares the state $|0110\rangle$ and send it to Bob who can then extract the information by measuring the qubits in the \mathcal{B}_1 -basis, therefore obtaining four bits of classical information, precisely the message sent by Alice. However, communicating one bit per qubit is obviously not the best thing that one can do with qubits. In fact, this way of sending classical bits is actually more expensive than sending them via a proper classical channel. It turns out, however, that the qubits offer an additional advantage over the classical bits: *one can communicate two classical bits by sending only one qubit.*

Once more, the trick relies on the possibility of generating entangled states: suppose Alice and Bob are given one particle each which has been previously prepared in the maximally entangled state $|\phi^+\rangle$. They don't know each other and have never interacted previously, before this entangled pair is given to them. Alice then can communicate to Bob two classical bits by sending him only one qubit. This is the so-called dense coding, an idea proposed by Bennett and Wiesner (Bennett & Wiesner, 1992; Barenco & Ekert, 1995). This is based on the fact that the four Bell-basis states can be projected onto the computational basis to convey two classical bits of information. This can clearly be seen in terms of the unitarity of the studied quantum logic gates. First, after receiving the qubit that Alice has sent to Bob, he performs $\text{CNOT}_{12}(|\phi^+\rangle)$, hence generating the disentangled state $|\psi_1\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)|0\rangle$. Second, he realises the operation $H_1(|\psi_1\rangle)$, thus obtaining the state $|0\rangle_1|0\rangle_2$. From this output, qubit 1 is referred to as the *phase* bit (+ or -), and qubit two as to the *parity* bit (this tells whether the spins are aligned or anti-aligned: $|\phi\rangle$ or $|\psi\rangle$). Hence, a measurement of this output in the computational basis should give the result 00: Bob finishes with two classical bits of information. In the same way, by using any of the remaining states of the Bell-basis $|\phi^-\rangle$, $|\psi^+\rangle$, $|\psi^-\rangle$, Bob

should obtain the following two classical bits output: 10, 01, and 11 respectively; thus, in any case, transmitting two classical bits per qubit. Note that this process can be seen as a way of performing *secure communication*: the qubit transmitted by Alice will convey two classical bits of information only if the receiver has the other qubit of the *a priori* distributed entangled pair. This is an example of the information content of quantum entanglement and the way it can be exploited for classical communication.

F. Quantum key distribution

Suppose that Alice and Bob now need to communicate an extremely confidential message, such that the information is not to be deciphered by a dangerous eavesdropper "Sal." This task can be accomplished with certainty only if Alice and Bob are allowed to share a private cryptographic *quantum key* K , a secret random bit string known only to them, in order to encode and protect the original message. The problem assumes that Alice and Bob have at their disposal a public classical channel, and a quantum channel that is insecure. Hence, the original problem of communicating a message has been converted into a cryptographic key exchange problem. This is often referred to in the literature as *quantum cryptography*.

As in the previous cases of entanglement-assisted communication, the key exchange can only be accomplished with certainty by means of quantum entanglement. It is to be added to this problem that Sal is an efficient eavesdropper: he can interact with the quantum information carriers used by Alice and Bob, and he can also tap, without disturbing, any classical communication that Alice and Bob may transmit during the process of sharing the private key. The quantum key distribution schemes are based on the no-cloning theorem, since, in contrast to the situation of classical communication, the message sent from Alice to Bob cannot be tapped and faithfully copied by an eavesdropper. Any 'excess' of Sal's eavesdropping should be easily detected by Alice and Bob, who can then abort the protocol and create a new key. Thus, any attempt by an eavesdropper to obtain relevant information about K and remain undetected should be negligible.

Let's see how to establish such a secured shared random key. Suppose that Alice and Bob share a supply of entangled (singlet) Bell states $|\psi^-\rangle$. Then, they perform the following protocol. Alice and Bob measure either σ_x or σ_z over each qubit they have¹⁰. Hence, each choice

¹⁰ Here, σ_i denote the Pauli matrices. These are single qubit transformations that can be used for phase shifting and flipping the qubits of the Bell basis: i) Apply σ_z to qubit 1: $|\phi^+\rangle \leftrightarrow |\phi^-\rangle$,

occurs with probability $1/2$. Once these measurements are performed, the observables they measure are publicly announced, but the obtained outcomes are not revealed. If their qubits are measured along different axes, the outcomes are uncorrelated, hence Alice and Bob discard their results. In contrast, if their qubits are measured along the same axis, their results, though random, are perfectly correlated, thus establishing a shared random key. It is easy to check that this protocol is robust against Sal's attacks to the quantum information carriers, where he can try, for example, to entangle his qubits with those transmitted between Alice (A) and Bob (B) and then perform a measurement of his qubits (after knowing the results announced by Alice and Bob). The result is that Sal (S) does not obtain any significant information from Alice's and Bob's and his own measurement results. Hence, the generated random key K is secure.

To see why this is so, suppose that Sal has indeed attacked the quantum channel in order to extract information from that of Alice and Bob. The most general possible state that describes A , B , and the intervention of S can be written as

$$|\mathbb{N}\rangle_{ABS} = |00\rangle_{AB} |e_{00}\rangle_S + |01\rangle_{AB} |e_{01}\rangle_S + |10\rangle_{AB} |e_{10}\rangle_S + |11\rangle_{AB} |e_{11}\rangle_S, \quad (48)$$

where we can imagine the states e_{ij} as the states of a surrounding environment—Sal (see Section IV). As $|\psi^-\rangle$ is an eigenstate of both $\sigma_x^A \sigma_x^B$, and $\sigma_z^A \sigma_z^B$ (eigenvalue -1), hence Alice and Bob can verify that effectively $\sigma_z^A \sigma_z^B = -1$ (the phase bit). Then, they must have

$$|\mathbb{N}\rangle_{ABS} = |01\rangle_{AB} |e_{01}\rangle_S + |10\rangle_{AB} |e_{10}\rangle_S, \quad (49)$$

and $\sigma_x^A \sigma_x^B = -1$ (the parity bit), which implies

$$|\mathbb{N}\rangle_{ABS} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle_{AB} - |10\rangle_{AB}) |e\rangle_S. \quad (50)$$

Comparing Eqs. (48), (49), and (50), it is clear that Sal's qubits must be unentangled from Alice's and Bob's if their pair (or any of the Bell-basis) is to be an eigenstate of $\sigma_i^A \sigma_i^B$, $i = x, z$. This means that despite Sal's efforts, the shared key is safe: even his knowledge of quantum mechanics does not allow him to learn anything about the secret random key! In contrast, if Alice and Bob measure a part of the shared key and find that the results are not perfectly correlated, then Sal may have been

successful, in which case they have to abort this key and try to generate a new secure one. Once more, it is evident that the capability to successfully perform a quantum key distribution protocol relies on the generation and distribution at will of particles in a highly entangled pair (Ekert, 1991; Bennett *et al.*, 1992(B); Bennett *et al.*, 1992(A)). Any state of the Bell-basis could serve for this purpose.

This is not the only available quantum protocol. In fact, the so-called BB84 protocol of Brassard and Bennett (Bennett & Brassard, 1984) does not require the entangled pairs to be shared by Alice and Bob: here, Alice can prepare the pairs herself, from which she measures one qubit of each pair and sends the other qubit to Bob. Then Bob can measure and verify his results with Alice as explained above. This scheme is as secure as the former. The corresponding security proofs can be found in Refs. (Mayers, 1998; Lo & Chau, 1999). The effects of the insecurity of the quantum channel can also affect the results of Alice's and Bob's measurement. However, it can be shown that the errors due to possible imperfections in the channel can be distinguished from the errors that occur because of Sal's eavesdropping (Mayers, 1998; Lo & Chau, 1999). Experimental demonstrations of quantum key distribution are far more advanced than any other QIP task. For an account of the main experimental achievements in this subject see, e.g., Refs. (Bennett & Brassard, 1989; Hughes *et al.*, 1995; Phoenix & Townsend, 1995; Gisin *et al.*, 2002).

G. Quantum data compression

A qubit is a useful measure of quantum information content. Jozsa and Schumacher have shown that given a system of n qubits, it is possible to find a subspace of Hilbert space in which one can describe any state vector of the system, and that the dimension of this subspace is $2^{nS(\rho)}$, for $S(\rho) < 1$ (Schumacher, 1995; Jozsa & Schumacher, 1994). Hence, only $nS(\rho)$ qubits are required to represent the quantum information content, where $S(\rho)$ is the von Neumann entropy of the quantum source,

$$S(\rho) = -\text{Tr} \rho \log_2 \rho, \quad (51)$$

$$\rho = \sum_i p_i |\Psi_i\rangle \langle \Psi_i|.$$

Here, ρ is the density matrix representing the system, $|\Psi_i\rangle$ are the states transmitted by the source and p_i their probability of transmission. The von Neumann entropy is a measure of the minimum asymptotic number of qubits that are required to compress the initial state of a system that is to be faithfully transmitted and finally recovered

and $|\psi^+\rangle \leftrightarrow |\psi^-\rangle$. ii) Apply σ_x to qubit 1: $|\phi^+\rangle \leftrightarrow |\psi^+\rangle$, and $|\phi^-\rangle \leftrightarrow -|\psi^-\rangle$. The Bell-basis states can be characterized as the simultaneous eigenstates of the commuting observables $\sigma_x^A \sigma_x^B$, and $\sigma_z^A \sigma_z^B$, where the eigenvalue of $\sigma_x^A \sigma_x^B$ is the parity bit, and the eigenvalue of $\sigma_z^A \sigma_z^B$ is the phase bit. These operators can in principle be measured simultaneously.

by a decoder. As can be seen, $nS(\rho) < n$, hence the name quantum data compression.

This is to be compared with classical data compression, where redundant data can also be compressed and then faithfully decoded. The main difference between the two is that classical compression has allowed only orthogonal states, while *any* superposition of states is allowed quantum-mechanically. Hence, a general quantum compression that involves non-orthogonal states does not have any classical analogue. In fact, if the quantum states to be compressed and transmitted are non-orthogonal, the encoder cannot make a copy of them because of the no-cloning theorem. The snag here is that a practical implementation of these ‘compressions’ and ‘decodings’ is extremely demanding. As pointed out in Ref. (Steane, 1998), this is the ultimate compression allowed by the laws of physics.

H. Quantum algorithms and quantum games

Quantum algorithms

Deutsch’s *quantum parallelism* is an outstanding property of a quantum computer. It points out that a quantum computer can perform certain computational tasks faster than any modern digital computer. This was rigorously stated in the ‘Deutsch problem,’ whose solution gave birth to the first quantum algorithm, the so-called Deutsch-Jozsa algorithm (Deutsch & Jozsa, 1992), where the interplay between interference effects and quantum entanglement gives rise to a celebrated speed up of the quantum computational process: this leads to an exponential gap between the complexity class of the quantum problem and the corresponding complexity class of the classical problem. In other words, the quantum parallelism leads to the solution of problems that are otherwise intractable by any classical means. After Deutsch’s, other quantum algorithms have been discovered, the most remarkable one being Shor’s algorithm for efficient factorisation of large numbers (Shor, 1994; Shor, 1996; Ekert & Jozsa, 1996). This finding is one of the main breakthroughs in the subject of quantum information theory. It established a solution to a problem that, from the complexity point of view, was thought to be intractable, and brings practical uses as a byproduct, because it is exactly the same difficulty of factoring a large number that holds up modern schemes for public key cryptography, such as the RSA scheme (Rivest *et al.*, 1978; Cocks, 1973). Other relevant algorithms are those of Simon (Simon, 1994), and Grover’s search algorithm (Grover, 1997). A common element to all these algorithms is the use of the quantum parallelism

property, where the linear superposition principle plays a remarkable role when extracting a ‘global’ information of a given function f . In this section we shall concentrate on a generalisation of Deutsch’s algorithm (Deutsch & Jozsa, 1992; Cleve *et al.*, 1998). A detailed analysis of Shor’s algorithm can be found in Ref. (Ekert & Jozsa, 1996).

Generalised Deutsch’s problem: Suppose we are given a device *oracle* that computes the Boolean function $f : x \in \{0,1\}^n \rightarrow f(x) \in \{0,1\}$ that takes any n -binary string x as input and produces a single bit $f(x) \in \mathcal{B}_1$ as output, in a single step. The problem assumes that the function f is either *constant* or *balanced* depending on whether the result of the 2^n possible evaluations gives the same output (0 or 1) or a situation where half of them are 0’s and the other half 1’s. The problem is to determine whether f is constant or balanced (we previously analysed the simplest case $n = 1$, where $f(0) = f(1)$ or $f(0) \neq f(1)$, in Subs. II(B)).

Before we give the solution to this problem, let us first analyse its complexity class: if we attempt to solve this problem with a classical computing device in the worst possible scenario, we shall have to call the oracle $2^{n-1} + 1$ times. Thus, the number of oracle queries grows exponentially with n . But there is a much cleverer way to solve this problem. In doing so, we start by replacing the classical oracle “ f ” with a quantum oracle \mathcal{U}_f which performs the unitary transformation $\mathcal{U}_f : |x\rangle |a\rangle \rightarrow |x\rangle |a \oplus f(x)\rangle$ in a single step, where $|x\rangle$ is an n -qubit state (input) such as the one given in Eq. (2), and $|a\rangle$ is an ancilla single qubit state ($a \in \mathcal{B}_1$). Thus, the solution of Deutsch’s problem is straightforward: Suppose the n -QR and the ancilla are initialised in the states $|x\rangle = |0\rangle^{\otimes n}$, and $|a\rangle = (|0\rangle - |1\rangle)/\sqrt{2}$. Next, perform the following protocol:

1. Apply the Hadamard transform H to $|x\rangle$. This leads to the state

$$|\Psi_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^{n+1}}} \sum_{x \in \{0,1\}^n} |x\rangle (|0\rangle - |1\rangle). \quad (52)$$

For the sake of clarity, the qubit $|x\rangle$ is explicitly given in Eq. (2).

2. Apply the quantum oracle to the quantum register: $\mathcal{U}_f(|\Psi_1\rangle)$. This yields

$$|\Psi_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^{n+1}}} \sum_{x \in \{0,1\}^n} (-1)^{f(x)} |x\rangle (|0\rangle - |1\rangle). \quad (53)$$

3. Next, perform a measurement to determine whether f is constant or balanced. This measurement can be realised as follows: Apply the Hadamard transform to all of the first n -qubits of the register given by Eq. (53). This yields

$$|\Psi_3\rangle = \frac{1}{2^{n+\frac{1}{2}}} \sum_{x,y \in \{0,1\}^n} (-1)^{f(x)+(x \cdot y)} |y\rangle (|0\rangle - |1\rangle). \quad (54)$$

This reduces the measurement problem to that of finding whether or not the first n qubits are in the state $|0\rangle$, thus solving Deutsch’s problem.

The effect of the Hadamard transform over an arbitrary n -QR in a given state $|x\rangle$, $x \in \{0,1\}^n$, is

$$|x\rangle \mapsto \frac{1}{2^{n/2}} \sum_{y \in \{0,1\}^n} (-1)^{x \cdot y} |y\rangle, \quad (55)$$

where the product $x \cdot y = (x_{n-1}y_{n-1} + \dots + x_1y_1 + x_0y_0)$. Here, $j = (j_{n-1}, \dots, j_0)$, $j = x, y$. For example, if $|x\rangle = |010\rangle$, hence $H(|x\rangle) \equiv \frac{1}{2^{3/2}}\{|000\rangle + |001\rangle - |010\rangle - |011\rangle + |100\rangle + |101\rangle - |110\rangle - |111\rangle\}$.

To see why the third step solves the problem, note that the probability of finding the system’s output $|\Psi_3\rangle$ in the initial state $|0\rangle \otimes |0\rangle \otimes \dots \otimes |0\rangle \otimes |a\rangle$ is

$$\frac{1}{2^{2n}} \left| \sum_{x \in \{0,1\}^n} (-1)^{f(x)} \right|^2 = \begin{cases} 1 & \text{if } f \text{ is constant} \\ 0 & \text{if } f \text{ is balanced} \end{cases} \quad (56)$$

The term inside the delimiters gives $2^n (-1)^{f(0 \dots 0)} = \pm 2^n$ when f is constant. Thus, a measurement of the first n qubits output determines with a 100% success rate whether f is constant or balanced. As said, this is actually a generalisation of Deutsch’s algorithm, which originally gave only a 50% of probability of success when solving this problem (Cleve *et al.*, 1998).

It is remarkable what has been done using this algorithm: its massive quantum parallelism led to the computation of all the 2^n possible values of $f(x)$ in one single run. This arises from the fact that the quantum oracle can perform its task for any linear combination of possible basis states in a single step: this is to be physically identified as an interference pattern. As to the complexity class of this quantised problem, we require only $O(n)$ steps to obtain the final answer. Hence, if we compare this result with that of the classical complexity class, it is found that Deutsch’s algorithm leads to an *exponential speedup* of the computations. This is a wonderful property that only a quantum computer can provide.

Deutsch’s and Grover’s algorithms have been implemented in bulk liquid NMR experiments but only for a few qubit register (Jones *et al.*, 1998(A); Jones & Mosca, 1998(B)). More recently, there has been the more demanding implementation of Shor’s factoring algorithm, also using NMR quantum computation. This has been done in the simplest scenario: factorisation of the number $N = 15$, by using $n = 7$ qubits (Vandersypen *et al.*, 2001).

Next, we examine very briefly the subject of game theory, and discuss the role that quantum computation may play when the players of a given ‘game’ are allowed to play “quantum strategies.”

Quantum games

Game theory is a well established branch of mathematics whose tools and formalism, mainly developed by J. von Neumann (von Neumann & Morgenstern, 1953), aims to solve the conflict between two or more competing parties (players) that hold particular interests. This has a vast range of applications in many different subjects such as social sciences, biology, and economics¹¹. By contrast, quantum game theory (Meyer, 1999; Meyer, 2000; Eisert *et al.*, 1999; Eisert & Wilkens, 2000; Benjamin & Hayden, 2001(A); Benjamin & Hayden, 2001(B)) has been born from motivations regarding QIP, where information has been recognised as a physical quantity. The usefulness of quantum games for ‘practical applications’ goes back to the idea that many physical, chemical, and biological quantum processes can be thought of as games.

The initial motivation is the recognition of new effects without classical analogue, which are associated with the quantum character of the ‘games’. For example, a two-player game (Meyer, 1999; Meyer, 2000; Eisert *et al.*, 1999; Eisert & Wilkens, 2000) can show a vanishing of ‘predominant strategies’ when the allowed ‘moves’ are made quantum-mechanically: these strategies should reappear only under the degrading of the quantum coherence (Meyer, 1999; Meyer, 2000; Eisert *et al.*, 1999; Eisert & Wilkens, 2000). For multi-player quantum games (Benjamin & Hayden, 2001(A); Benjamin & Hayden, 2001(B)), it has been shown that when the resources controlled by competing agents are entangled, they can cooperate to perfectly exploit the ‘game’ (Benjamin & Hayden, 2001(A); Benjamin & Hayden, 2001(B)). This has been performed for multi-player quantum games in the cases of the “Minority game,” and a game analogous to “Prisoner’s Dilemma” (Benjamin & Hayden, 2001(A); Benjamin & Hayden, 2001(B)), with the interesting result that such games can exhibit forms of ‘coherent’ quantum equilibrium¹² which have no analogue in classical games, or even in two-player quantum games. Thus, quantum players can exploit their

¹¹ See, e.g., <http://www.unifr.ch/econophysics/minority/>.

¹² An equilibrium is understood here as a set of strategies, such that neither player can improve his probability of winning by changing his strategy while the others do not.

moves highly efficiently through the use of collaborative strategies.

Because of the computational and physical rewards when performing both quantum algorithms and quantum games, one might be tempted to try to establish a common framework that yields a connection between the two. Many situations in nature, e.g., in biology, can be thought of as games where the competing agents try to establish a strategy that allows them to maximise their pay-off (e.g., their energy efficiency). In this respect, quantum algorithms may play an important role. They could be viewed, for instance, as games played between classical and quantum agents (Meyer, 1999; Meyer, 2000). One can imagine that a deeper understanding of the underlying structure of certain “quantum strategies” for performing quantum games may lead to the possibility of finding a different approach to gain insight into some fundamental physical and chemical processes in the quantum regime. One may think, for example, of the decoherence phenomenon as a *dynamic* multi-agent quantum game where at any given time t , we ask whether or not a given quantum register has been driven by an “environment strategy” to a situation where the QR coherence is lost. From a QIP perspective, we would like to find a way to play this game such that the registers answer is always “no.” This example is in contrast with the above proposals (Meyer, 1999; Meyer, 2000; Eisert *et al.*, 1999; Eisert & Wilkens, 2000; Benjamin & Hayden, 2001(A); Benjamin & Hayden, 2001(B)), where the quantum games are played ‘statically,’ in the sense that they are played only once, and hence there is no record of the players history. Dynamical quantum games should be an interesting issue to address in the future, in particular because it could give rise to a new view of addressing *quantum memory effects*, and hence of understanding decoherence. Currently, there is an intense search to find new quantum algorithms. Finding new elements of the repertoire of the advantages of a quantum computer over its classical counterpart would bring, along with the possible development of novel quantum strategies, new insight into the understanding of basic processes in the interdisciplinary field of QIP.

The developments that came after the discovery of efficient quantum algorithms call for the need to solve another outstanding matter: the stabilisation problem. It is clear that environmental influences disturb the quantum computers capability of generating reliable quantum interference and quantum entanglement, hence destroying the possibility of performing arbitrarily complex quantum computations such as quantum algorithms. Fortunately, it was shortly shown afterwards, by Shor (Shor, 1995) and Steane (Steane, 1996(A); Steane, 1996(B); Steane, 1996(C)), that quantum error-correcting codes

exist, thus alleviating this situation. Next, the environmental problem mentioned above, and possible ways to overcome it, including fault-tolerant quantum computation itself, shall be briefly discussed.

IV. QUANTUM DECOHERENCE AND QUANTUM ERROR CORRECTION

The list of quantum hardware requirements to build a quantum computer presented in Section II possess a common difficulty. This is the problem of stability, which spoils the unitarity of the register evolution, and hence compromises the usefulness of any given computational task. It can be defined by two main ingredients: *noise*, the coupling that may exist between the state of the computer and its surrounding environment, and *imprecision*, the inaccuracy with which elementary quantum gates are performed in an arbitrarily complex computation (Preskill, 1998). As has been discussed, in order to perform quantum computations, a *coherent* evolution of the qubits is required. Noise causes the quantum computer to evolve from a pure quantum state to a statistical mixture of quantum states that exhibit no phase difference between them, the so-called *decoherence* (Zurek, 1991). Thus, decoherence implies that two of the main properties of a quantum computer, say, i) the capability to maintain superpositions of its states, i.e., to perform quantum interference reliably, and ii) the capability to reliably perform entanglement between its qubits, are lost during a given computational process. This can be illustrated by stating that, e.g., if $|S\rangle$ is a superposition of states $|\Phi_i\rangle$ of the quantum computer, say

$$|S\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\Phi_1\rangle + e^{i\varphi} |\Phi_2\rangle), \quad (57)$$

then, a *coherent* evolution of the QC state requires that the $|\Phi_i\rangle$'s and the phase φ of the superposition remain unchanged by both noise and imprecision¹³. In practice, these criteria are very difficult to match. It is easy to see that an imprecise operation could result in a rotation of the state such that the phase φ becomes undefined. Also, and perhaps more stringent, is the fact that the coupling of $|S\rangle$ to the environment can result in a state

¹³ This can be seen in the case of quantum entanglement as follows: suppose that the state $|S\rangle$ is created in an entangled state, say $|\Phi_1\rangle = |01\rangle$, $|\Phi_2\rangle = |10\rangle$, and $\varphi = \pi$ (the singlet state $|01\rangle - |10\rangle$). Hence, its phase bit (“-”) and its parity bit (spin states are antialigned, “ $|\psi\rangle$ ”) should be guaranteed throughout the computational process if the system is to evolve coherently.

of the type $\frac{1}{\sqrt{2}}(|\Phi_1\rangle|e_1\rangle + e^{i\varphi}|\Phi_2\rangle|e_2\rangle)$, which also affects the phase φ when the states of the environment $|e_i\rangle$ become orthogonal, i.e., when $\langle e_1|e_2\rangle \rightarrow 0$. This system-environment coupling—decoherence—results in a leakage of the information such that superpositions of the system’s states evolve into entanglements with the environmental degrees of freedom, thus spoiling the unitarity of the evolution.

In the case of a spin half quantum (qubit) system, where $|S\rangle$ can be represented as a general state $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, the qubit-environment interaction leads, in the worst scenario, to a state of the type

$$|e_i\rangle(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) \rightarrow \alpha(c_{00}|e_{00}\rangle|0\rangle + c_{01}|e_{01}\rangle|1\rangle) + \beta(c_{10}|e_{10}\rangle|1\rangle + c_{11}|e_{11}\rangle|0\rangle),$$

where $|e_i\rangle$ is the initial state, $|e_{ij}\rangle$ are the final states of the environment (not necessarily orthogonal), and c_{ij} are noise coefficients. It is interesting that this evolution can be rewritten as

$$|e_i\rangle|S\rangle \rightarrow \{|e_I\rangle I + |e_x\rangle\sigma_x - i|e_y\rangle\sigma_y + |e_z\rangle\sigma_z\}|S\rangle, \quad (58)$$

where $|S\rangle$ is the initial state of the qubit, $e_I = c_{00}|e_{00}\rangle + c_{10}|e_{10}\rangle$, $|e_x\rangle = c_{01}|e_{01}\rangle + c_{11}|e_{11}\rangle$, and so on. The Pauli operators σ_i , and the identity I , are written in the computational basis B_1 . Recall that $-i\sigma_y = \sigma_x\sigma_z$. It follows from the Pauli matrices in Eq. (58) that the errors involved on each qubit are basically of three types: “*bit flip*” (σ_x) errors, “*phase flip*” (σ_z) errors, or “*bit/phase flip*” ($\sigma_x\sigma_z$) errors (Steane, 1996(A); Steane, 1996(B); Steane, 1996(C)). Thus, the problem of qubits error correction is reduced to the problem of correcting the above-mentioned errors. In these terms, the physical processes of phase decoherence and spontaneous emission can be stated as:

- i. *Phase decoherence*: $(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle)|e\rangle \rightarrow \alpha|0\rangle|e_0\rangle + \beta|1\rangle|e_1\rangle$. This is given by $\{|e_I\rangle, |e_z\rangle \neq 0, |e_x\rangle = |e_y\rangle = 0, \langle e_I|e_z\rangle = 0\}$.
- ii. *Spontaneous emission*: $(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle)|e\rangle \rightarrow \alpha|0\rangle|e_0\rangle + \beta(|1\rangle|e_1\rangle + |0\rangle|e_2\rangle)$, $\langle e_1|e_2\rangle = 0$. This is given by $\{|e_x\rangle = -|e_y\rangle, \langle e_x|e_I\rangle = -\langle e_x|e_z\rangle, \langle e_I|e_z\rangle = \langle e_x|e_x\rangle\}$. If Γ is the spontaneous emission rate, it is found that $\langle e_x|e_x\rangle = \langle e_y|e_y\rangle = \langle e_z|e_z\rangle = \frac{1}{4}(1 - e^{-\Gamma t})$, and $\langle e_I|e_I\rangle = \frac{1}{4}(1 + 3e^{-\Gamma t})$.

This latter process is referred to in the NMR literature as the T_1 (relaxation) process, and the former as the T_2 (dephasing) process. In any case, it is clear that the decoherence interaction entangles qubits with the environment. To visualise, e.g., the case of *phase decoherence*, it is useful to write the qubit evolution in terms of its den-

sity matrix operator. Thus, tracing out the environment states yields the evolution

$$\begin{pmatrix} |\alpha|^2 & \alpha\beta^* \\ \alpha^*\beta & |\beta|^2 \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} |\alpha|^2 & \alpha\beta^*\langle e_0|e_1\rangle \\ \alpha^*\beta\langle e_1|e_0\rangle & |\beta|^2 \end{pmatrix}, \quad (59)$$

where the off-diagonal elements “*coherences*,” vanish for $\langle e_0|e_1\rangle \rightarrow 0$, in agreement with item (i). This is the origin of the term *decoherence*. Now that the problem has been identified, it is necessary to find a way to avoid or correct decoherence. In so doing, there is a powerful though counter-intuitive method: quantum error correction. By using this technique, a quantum computer is able to compute an arbitrary number of quantum logic gates—a complex quantum interference network—and produce the right answer even though the qubits in the computer relax spontaneously many times during the computational process (Steane, 1996(A, B, C)). To understand why this is so, let’s start by noting that the principles of quantum error correction (QEC) are based on two main elements: the quantum states to be processed and the type of noise to be corrected. In order to describe the method, we follow (Steane, 1996(A, B, C)).

Suppose the coupling between an m -quantum system (Q) and its environment (E) is described by

$$|e\rangle|\Phi\rangle \longrightarrow \sum_s |e_s\rangle M_s |\Phi\rangle, \quad (60)$$

where $|e\rangle$ ($|\Phi\rangle$) is the initial state of the environment (system). The action of the “error operators” M_s on the system is unitary. These M_s ’s are a tensor product of operators (one for each qubit of the whole register) that belong to the set $\{I, \sigma_x, -i\sigma_y, \sigma_z\}$. The final states of the environment $|e_s\rangle$ need not be orthogonal nor normalised, and it is clear that the noise process of Eq. (60) is irreversible because the environment cannot be controlled. To perform QEC, the system Q has to be coupled to another system “ancilla” (a), which is composed of $n - m$ qubits in the definite state $|0\rangle_a$ (the whole register “ $Q+a$ ” contains n qubits). The interaction A between Q and a , the *syndrome extraction*, is unitary and satisfies

$$A(|0\rangle_a M_s |\Phi\rangle) = |s\rangle_a M_s |\Phi\rangle \quad \forall M_s \in \mathcal{S}. \quad (61)$$

Here, the ancilla states $|s\rangle_a$ are mutually orthogonal, and the syndrome s gives us information (bits) about the kind of noise the register is experiencing. The set \mathcal{S} is the set of error operators M_s for which syndrome extraction works—the set of correctable errors. This depends on the encoding: a central part of QEC is to find the best syndrome extraction operators (Steane, 1996(A, B, C); Knill & Laflamme, 1997).

Next, the syndrome extraction A is applied to the composite noisy-ancillary “ $Q + E + a$ ” state. This yields

$$A \left\{ \sum_s |e_s\rangle |0\rangle_a M_s |\Phi\rangle \right\} \longrightarrow \sum_s |e_s\rangle |s\rangle_a M_s |\Phi\rangle . \quad (62)$$

The next step is remarkable: by measuring the ancilla state in the $\{|s\rangle_a\}$ -basis, the ancilla is projected onto one particular state $|s\rangle_a$, and the outcome value s becomes known to us. Thus, the whole system “ $Q + E + a$ ” is projected onto the state $|e_s\rangle |s\rangle_a M_s |\Phi\rangle$, where s is known. Furthermore, from the measurement result (value of s), one can identify the operator M_s ¹⁴, thus applying M_s^{-1} to “ $Q + a$ ” in order to obtain the final state¹⁵

$$|e_s\rangle |s\rangle_a |\Phi\rangle . \quad (63)$$

This means that our problem has been solved: *the original (noise-free) state $|\Phi\rangle$ has been recovered.* Note: i) After the syndrome extraction operation, the ancilla state $|s\rangle_a$ depends on the noise but not on the quantum state to be corrected (see Eq. (61)). ii) After the projective measurement, instead of the general noise of Eq. (60), one is left with only one error operator, M_s , which is now known to us. iii) The ancilla a can be again prepared in the state $|0\rangle_a$ for further corrections, thus allowing the quantum computer to overcome decoherence and perform further complex computations. iv) The last step, measure of the ancilla, can be avoided: this can be accomplished by defining another unitary interaction, namely C , that acts between Q and a (after the syndrome extraction) as follows $C(|s\rangle_a |\Phi\rangle) = |s\rangle_a M_s |\Phi\rangle$. Then the final state of the whole register becomes $|\Phi\rangle \sum_s |e_s\rangle |s\rangle_a$, thus transferring the “ $Q + E$ ” entanglement onto an “ $a + E$ ” entanglement (this procedure is illustrated in the Example 2; Appendix C.2).

The unitary operation that completes the QEC process, namely *recovery* “ \mathcal{R} ,” in general establishes that for any $|\delta\rangle, |\delta_s\rangle \in “E + a”$, $\mathcal{R}(|\delta\rangle M_s |\Phi\rangle) = |\delta_s\rangle |\Phi\rangle$. In this sense, the main goal of QEC is to identify the set $\{|\Phi\rangle\}$, and the syndrome extraction A , in order to correct the noise introduced by M_s . In so doing, it suffices to find an orthonormal set of recoverable states (a subspace of Hilbert space) to be able to have a recoverable Hilbert space “ \mathcal{RH} ”. Thus, QEC can be viewed as a *projection* of Hilbert system’s space onto the recoverable Hilbert space. A *quantum codeword* $\{|j\rangle\}$ is a set of orthonormal quantum states that spans \mathcal{RH} . It turns out that A and \mathcal{R} are possible if and only if the codewords satisfy $\langle j | M_m^\dagger M_n | k \rangle = 0$, and $\langle j | M_m^\dagger M_n | k \rangle = \langle k | M_m^\dagger M_n | j \rangle$,

$\forall M_s \in \mathcal{S}$, and $\langle j | k \rangle = 0$ (Knill & Laflamme, 1997); see Example 1 given in Appendix C.1. For concrete examples of QEC code constructions, see, e.g., (Shor, 1995; Steane, 1996(A, B, C); Calderbank & Shor, 1996; Laflamme *et al.*, 1996); see Example 2, Appendix C.2.

In Examples 1 and 2, the used codewords only allowed for the correction of either bit-flip (σ_x) or phase-flip (σ_z) errors. A general method that protects against a more general noise, say a combination of σ_x , σ_z , and $\sigma_x \sigma_z$ errors, has been described in (Steane, 1996(A, B, C); Calderbank & Shor, 1996; Knill & Laflamme, 1997), and is based on the ‘dual code theorem.’ Here, the essential point is to note that

$$\tilde{H} \sum_{i \in C} |i\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^k}} \sum_{i \in C^\perp} |i\rangle , \quad (64)$$

where $\tilde{H} \equiv H_1 H_2 H_3 \cdots H_n$ is the Hadamard transform applied to all the members, say n states, of a linear classical error correcting code C (Steane, 1996(A, B, C)). The observation is that the action of \tilde{H} over C produces another linear classical error-correcting code, the superposition of all the members of the dual code C^\perp . The dual C^\perp is defined as the set of all vectors v such that $v \cdot u = 0 \forall u \in C$. Hence, as long as both C and C^\perp have good classical error correction properties, it can be shown that it is possible to correct both σ_x and σ_z errors (and hence errors involving the two of them, i.e., $\sigma_x \sigma_z$) by using states of the type given in Eq. (64). For more details of this code construction, the reader is referred to (Steane, 1996(A, B, C); Calderbank & Shor, 1996); see Example 3, Appendix C.3.

In conclusion, the method of QEC is mainly a matter of finding sets of states $|\Phi\rangle$, and the syndrome extraction A that allows one to suppress the influence of noisy environments M_s . Most of this work has been done by revisiting existing classical error-correcting codes. The theory of quantum error-correcting codes has been established within a general framework in (Knill & Laflamme, 1997). Quantum error-correction and stabilisation schemes have been built on the work of Shor (Shor, 1995), Steane (Steane, 1996(A, B, C)), Calderbank and Shor (Calderbank & Shor, 1996), and the later work reported in (Ekert & Macchiavello, 1996; Laflamme *et al.*, 1996; Gottesman, 1996; Calderbank *et al.*, 1997). There is an important issue that has been left out of the discussion presented above: the effect of the proper quantum gates, ancilla, and measurements realised by the QEC method. How perfect must they be in order to do a proper job of error correction instead of introducing further noise and imprecision to the system $Q + a$? Fortunately, the answer to this problem has been dealt with satisfactorily in what has been termed fault-tolerant QEC (Shor, 1997; Kitaev, 1997; Steane, 1997;

¹⁴ This is because s is in a one-to-one correspondence with M_s .

¹⁵ The transformation M_s^{-1} is accomplished by means of a sequence of single qubit quantum gates originated from the set $\{\sigma_x, \sigma_z \text{ or } -i\sigma_y\}$.

Preskill, 1998). It was initially proposed by Shor (**Shor, 1997**) and Kitaev (**Kitaev, 1997**), and the central idea was to perform a convenient design of all the required logic gates where the evolving states are verified wherever possible, and the syndrome extraction repeated. In this way it is guaranteed that the QEC method “corrects more noise than it introduces.” These ideas have been conveniently reviewed in (**Preskill, 1998**), where it has been estimated that a requirement for reliable quantum fault-tolerant computation is that the quantum hardware used in the computations must have a decoherence per qubit per gate below a finite threshold. This has been estimated at 10^{-5} to 10^{-2} (**Steane, 1997; Preskill, 1998**). In addition, fault-tolerant computation allows a quantum computer that is built from qubits that undergo spontaneous emission decay with lifetime τ_{rel} to perform a complex quantum computation: the quantum coherence can be preserved for a period of order $10^4 \tau_{rel}$ (**Steane, 1997**). This counter-intuitive result means that quantum coherence is preserved even though the qubits may have relaxed (and been re-excited) 10^4 times during the execution of the computations (**Steane, 1997**).

Error-correction protocols have been implemented in nuclear magnetic resonance experiments, but the inherent limitations of this technique (see Sec. V for discussions) prevent its application to quantum information processing. In (**Chiaverini et al., 2004**), an experimental realisation of quantum error correction using trapped ions has been reported. They demonstrated quantum error correction using three beryllium atomic-ion qubits confined to a linear, multi-zone trap. They used a three-qubit quantum error-correcting code in order to protect a one-qubit (primary ion) state against ‘spin-flip’ errors. In the experiment, the errors are induced simultaneously in all qubits at various rates, and the encoded state is decoded back to the primary ion one-qubit state, making error information available on the ancilla ions, which are separated from the primary ion and measured. Finally, the primary qubit state is corrected on the basis of the ancillae measurement outcome. The error correction is verified by comparing the corrected final state to the uncorrected state and to the initial state (**Chiaverini et al., 2004**).

In this section, only the method of QEC for correcting quantum noise has been presented. However, there have been different, complementary, proposals for suppressing, e.g., dynamical methods, or avoiding decoherence, e.g., by resorting to the use of decoherence-free subspaces (**Reina et al., 2002**). In the latter, the evolution of a quantum register in a noisy environment is studied in detail. In particular, it is shown that under certain conditions—the collective decoherence coupling—it is possible to find a subspace of Hilbert’s system space

whose states evolve in a decoherence-free fashion (**Reina et al., 2002**). From this point of view, one can argue that for arbitrarily complex quantum computations to ever be implemented in the laboratory, a combination of stabilisation schemes, such as fault tolerant QEC, decoherence-free subspaces, and dynamical methods to overcome decoherence, must be incorporated to the quantum registers dynamical evolution. In (**Reina & Bririd, 2008**), a numerically exact real-time path-integral approach (**Makri & Makarov, 1995**) has been used in order to account for the non-Markovian dissipation of a solid-state qubit system.

Next, we comment on some of the practicalities regarding QIP implementations, with a particular emphasis on solid-state technology.

V. PHYSICAL QUBITS

A quantum computation demands a coherent quantum evolution, and an active control or manipulations of the qubits, which are to be performed via unitary operations. We next give a brief discussion of some of the first hardware proposals (and/or demonstrations) for quantum information processing.

Cavity QED: originally proposed in (**Pellizzari et al., 1995**), this hardware design is based on the idea of trapping neutral atoms inside a small high finesse optical cavity. Here, the quantum information is stored in the internal states of the atoms, which interact with each other via the coupling to the normal modes of the electromagnetic field in the cavity. By means of pulsed lasers, a transition in one atom can be induced as a result of the internal state of another atom, thus performing conditional dynamics. The first experimental attempt at producing these type of quantum gates was realised by Turchete *et al.* (**Turchete et al., 1995**). A variant of this scheme is that proposed by Cirac *et al.* (**Cirac et al., 1996; Cirac et al., 1997**), allowing a further step: quantum communication. Here, instead of using a photon to couple the atoms, the quantum information is stored in the polarisation of the photon, and the trapped atoms are used as mediators of the interaction amongst the photons via high- Q optical cavities and optical fibres (**Cirac et al., 1996; Cirac et al., 1997**): in this way, quantum information can be transferred between separated atoms (e.g., ion traps, see below), in order to produce photon based logic gates (e.g., phase shift gates, see Ref. (**Cirac et al., 1997**)). More recently, other proposals involving QED effects for quantum logic have been given in (**Imamoglu et al., 1999; Rauschenbeutel et al., 1999; Rauschenbeutel et al., 2001; Leuenberger et al., 2005**).

Ion traps: proposed by Cirac and Zoller, this scheme has single ions confined in a linear Paul trap as the qubit system (Cirac & Zoller, 1995; Cirac & Zoller, 2000). Thus, the qubit states can be represented as $|g\rangle \equiv |0\rangle$, and $|e\rangle \equiv |1\rangle$, the ground state, and a (long-lived metastable) excited state respectively. This ion system is very well shielded from the environment: almost spontaneous decay is the main source of decoherence. The preparation and measurement of corresponding (initial and final) states is easily accomplished by methods of optical pumping and laser cooling, and by means of ‘quantum jump’ or ‘electron shelving’ measurement technique, respectively (Monroe *et al.*, 1995; Blatt & Wineland, 2008).

Single qubit gates are performed via individually addressing the ions with pulsed lasers tuned at the transition frequency ω . This originates Rabi oscillations between the qubit states $|0\rangle$, and $|1\rangle$. Thus, arbitrary single-qubit gates can be performed by an appropriate timing and choosing of the laser phase.

Conditional logic gates rely on a beautiful but rather more complicated effect. The interactions in the ion trap are mainly given by the Coulomb repulsion between the ions. This implies a spectrum of coupled normal modes of vibration for the trapped ions, and the absorption or emission of a laser photon by the ion can be tailored in such a way that a normal mode involving many ions recoils coherently. The lowest frequency vibrational mode (frequency μ) is the centre-of-mass (*cm*) mode. Via laser cooling, these ions can be kept at an energy $k_B T \ll \hbar\mu$, hence guaranteeing that each vibrational mode occupies its quantum ground state. The next step, the generation of a “*cm* phonon,” is crucial to this scheme: by shining an ion, say the *n*th, with a properly timed laser pulse of frequency $\omega - \mu$, the state $|e\rangle_n$ can be made to evolve into $|g\rangle_n$ at a cost of the transition $|0\rangle_{cm} \rightarrow |1\rangle_{cm}$ of the *cm* oscillator. This operation transforms

$$|g\rangle_n |0\rangle_{cm} \rightarrow |g\rangle_n |0\rangle_{cm}; \quad |e\rangle_n |0\rangle_{cm} \rightarrow -i |g\rangle_n |1\rangle_{cm}, \quad (65)$$

thus, inducing an interaction between the ions via the collective state of motion of all the ions (the produced *cm* phonon). Next, the quantum information must be transferred from the *cm* phonon to the internal state of one of the ions, thus completing the logic gate. This procedure must be tailored in such a way that the *cm* mode returns to its ground state by the end of the computational process. It has been shown that this hardware design requires 5 appropriately tailored laser pulses in order to produce conditional CNOT gates (Cirac & Zoller, 1995; Cirac & Zoller, 2000). The experimental preparation, single gate realisation, and measurement for a single trapped ion was first demonstrated in (Monroe *et al.*, 1995). Another ion

trap-based scheme for quantum computation has led to the experimental demonstration of up to four qubits (atoms) entanglement (Molmer & Sorensen, 1999; Sackett *et al.*, 2000). In (Blatt & Wineland, 2008), the state-of-the-art, as well as some of the original contributions and developments of the ion traps computers are highlighted.

Nuclear magnetic resonance: this hardware design provided the first few-qubit quantum processors realised in the laboratory, and, up to some point, had the ‘lead’ as to the achievement of a coherent manipulation of qubits is concerned. One of the key experiments has involved 7 qubits, in order to demonstrate the simplest possible case of Shor’s factoring algorithm (Vandersypen *et al.*, 2001). This hardware scheme uses nuclear magnetic resonance (NMR) technology. The qubits are now represented by the nuclear spins in a particular molecule, where the spin states “up” or “down” serve as qubits. By placing the molecule in a large magnetic field, these nuclei spin states can be manipulated by applying oscillating magnetic fields in pulses of controlled duration. These qubits have very long decoherence and relaxation times (see table below). As said, Rabi oscillations of the spin can be induced by applying a pulsed rotating magnetic field of frequency ω (the energy splitting between the spin-up and spin-down states). Arbitrary single-qubit gates can be realised by an appropriate timing of this pulse. This process works in the presence of all of the molecule spins because only the spins on resonance respond to such an excitation. Two-qubit gates can be performed via the dipole-dipole spin interaction. Since the energy splitting between qubit states $|\uparrow\rangle$, and $|\downarrow\rangle$ for one spin depends on the state of neighbouring spins, the application of a resonant pulse that affects one spin is conditioned on the state of another spin. This produces the required conditional dynamics. For experimental demonstrations, see, e.g., (Gershenfeld & Chuang, 1997; Chuang *et al.*, 1998(A); Chuang *et al.*, 1998(B); Cory *et al.*, 1997; Knill *et al.*, 1998; Jones *et al.*, 1998(A); Jones & Mosca, 1998(B); Vandersypen *et al.*, 2001).

Major drawbacks of the NMR computers stem from their intrinsic scalability problems (the ratio of the coherent signal to the background declines exponentially with the number of spins per molecule), and from the fact that individual qubits can neither be directly prepared nor measured (only the average state of many processors is detectable). In fact, most experts agree that there is no chance that NMR-based qubits would succeed as scalable systems for the implementation of the controlled large-scale multipartite interference required for quantum computing.

Optical lattices & Bose-Einstein condensates: the recent experimental observation of a quantum phase transition from a superfluid to a Mott insulator in an ultracold gas has opened the way to a new hardware prospectus (Greiner *et al.*, 2002; Mandel *et al.*, 2003; Giamarchi *et al.*, 2008; Bloch, 2008; Brennen *et al.*, 1999; Jacksch *et al.*, 1999). By creating an optical lattice (an array of microscopic trapping potentials formed by laser light), a light-wave interference pattern which gives rise to an energy landscape of mountains and valleys, a gas of rubidium atoms has been reversibly switched from a superfluid to an insulating phase (Greiner *et al.*, 2002), where the rubidium atoms of the condensate have two different behaviours. They can either i) share the same quantum state in the superfluid phase and move freely between valleys, or ii) remain trapped in an individual valley, as a result of an increase in the intensity of the laser beams, which force the gas into an insulating phase.

This phase transition was predicted to occur in an optical lattice by Jacksch *et al.* (Jacksch *et al.*, 1999), where conditional dynamics and quantum entanglement has been proposed in moving trap potentials as a result of cold controlled collisions between two atoms. The experimental possibility of switching back and forth between superfluid and insulating behaviour brings an exciting development and is the subject of intense experimental activity (Bloch, 2008; Giamarchi *et al.*, 2008). In particular, the ideal array of single atoms in the insulating phase has become useful for multipartite entanglement generation (Bloch, 2008). Here, the two internal states (magnetic moment) of the rubidium atoms can represent the qubit states $|0\rangle$, and $|1\rangle$. Scalability can be guaranteed due to the large number of rubidium atoms in the optical lattice, which can serve as a quantum memory (Bloch, 2008).

The storage of ultracold (n K temperatures) quantum gases in perfect large arrays of atoms (optical lattices) has provided a good tool for investigating quantum coherence and generating large-scale entanglement, and thus also leading to quantum information processing tasks in such artificial crystal structures. These arrays can also function as versatile model systems for the study of strongly interacting many-body systems on a lattice (Bloch, 2008).

Quantum dots & solid-state qubits: There is much current excitement about the possibility of using solid-state based devices for the achievement of quantum computation tasks (Fushman *et al.*, 2008; Robledo *et al.*, 2008; Clarke & Wilhelm, 2008). In particular, quantum dots are advantageous due to the existing and well developed nanofabrication technology and the ease of

incorporating them into current opto-electronic devices. The quantum mechanical nature, the high degree of engineering and quantum control of individual wavefunctions of solid-state systems, besides intrinsic scalability properties, make, for example, quantum dots (Fushman *et al.*, 2008; Robledo *et al.*, 2008) and Josephson junctions (Makhlin *et al.*, 2001; Clarke & Wilhelm, 2008) very promising candidates for the physical implementation of QIP.

There are several proposals that consider different physical degrees of freedom as representative of solid-state qubit systems. Below we mention only some of these design schemes for quantum computation proposed to date: Kane (Kane, 1998) has proposed a scheme which encodes information onto the nuclear spins of donor atoms (like P) in doped silicon electronic devices where externally applied electric fields are used to perform logical operations on individual spins. Privman *et al.* (Privman *et al.*, 1998) suggested controlling the hyperfine electron-nuclear interaction via the excitation of the electron gas in quantum Hall systems. Loss and DiVincenzo (Loss & DiVincenzo, 1999; Burkard *et al.*, 1999) have presented a scheme based on electron spin effects, in which coupled quantum dots are used as a quantum gate. This scheme is based on the fact that the electron spins on the dots have an exchange interaction J which changes sign with increasing external magnetic field. Vrijen *et al.* (Vrijen *et al.*, 2000) considered electron spin resonance transistors in Silicon-Germanium heterostructures: one and two qubit operations are performed by applying a gate bias.

The above proposals, however, require the attachment of electrodes or gates to the sample in order to manipulate the nuclear spin qubit. Such electrodes are likely to have an invasive effect on the coherent evolution of the qubit, thereby destroying quantum information. In reference (Reina *et al.*, 2000(A)), an NMR solid-state based mechanism for quantum computation free from these shortcomings is proposed.

Possible quantum gate implementations have also been proposed by Barenco *et al.* (Barenco *et al.*, 1995(B)) by considering electronic charge effects in coupled QDs, however this scheme has as the main disadvantage rapid phonon decoherence, as compared with the above proposals. Imamoglu *et al.* (Imamoglu *et al.*, 1999) have considered a quantum computer model based on both electron spins and cavity QED which is capable of realising controlled interactions between two distant QD spins. In their model, the effective long-range interaction is mediated by the vacuum field of a high finesse microcavity, and single qubit rotations and CNOT operations are realised using electron-hole Raman transitions induced by classical laser fields and the cavity mode.

A different scheme exploits the exciton degrees of freedom of a QD system in order to generate an entangling network setup by exploiting (Förster) resonant energy transfer processes between coupled QDs (Reina *et al.*, 2000(B); Quiroga & Johnson, 1999; Lovett *et al.*, 2003(A,B); Nazir *et al.*, 2005). Related schemes, that also exploit exciton degrees of freedom for quantum computation, have been put forward in (Biolatti *et al.*, 2000; Troiani *et al.*, 2000).

Quantum dots can be constructed from inorganic or organic semiconductors, the latter being of special interest since they can constitute actual molecular architecture arrays of organic heterostructures, the so-called block copolymers (Mujica *et al.*, 2009). They are easier to construct than the inorganic systems, since they do not require expensive pieces of equipment as required for molecular beam epitaxy or metal-organic chemical vapour deposition. In principle, it is possible to construct an unlimited variety of organic heterostructures, since the interface between the materials is a chemical carbon-carbon bond, in contrast to inorganic ones, where it is required that the materials exhibit similar lattice constants to avoid interfacial stress, which notably limits the variety of heterostructures that can be synthesised. In (Mujica *et al.*, 2009) a global quantum computing scheme that uses molecular architectures based on π -conjugated block copolymers has been reported.

Within the quantum dots range of proposals, there have been some recent experimental demonstrations of controlled qubit gates, such as controlled phase shifts (Fushman *et al.*, 2008), and controlled-phase gates (Robledo *et al.*, 2008). In (Fushman *et al.*, 2008), the coupling between a single quantum dot and a photonic crystal nanocavity has allowed controlled phase and amplitude modulation between two modes of light at the single-photon level. As a perspective of such an experimental realisation, the combination of quantum logic devices and quantum nondemolition measurements on a chip are expected (Fushman *et al.*, 2008). In (Robledo *et al.*, 2008), a demonstration of conditional dynamics for two coupled quantum dots is reported. Here, the logic gate dynamics is induced by means of a transition to an optically excited state which is controlled by the presence or absence of an optical excitation in the neighboring dot. The dots interact via a tunnel coupling between optically excited states and can be optically gated by applying a laser field. Other recent demonstrations already incorporate the design of robust optically programmable quantum dots electron spin memories (Kroutvar *et al.*, 2004), and molecular ensembles as quantum memories for solid state circuits in hybrid quantum processors (Rabi *et al.*, 2006) that are envisioned as devices for the generation, control, and communication of multipartite quan-

tum entanglement and for the realisation of large scale conditional dynamics.

Superconducting circuits (see Fig. 7) are macroscopic devices in size which can exhibit quantum behaviour, such as quantized energy levels, superpositions, and entanglement of states (Makhlin *et al.*, 2001; Clarke & Wilhelm, 2008). The building blocks of such circuits are the so-called superconducting qubits, and electric charge and magnetic flux degrees of freedom are used as quantum hardware for quantum computing (Makhlin *et al.*, 2001; Clarke & Wilhelm, 2008). Here, the quantum states can be manipulated by using electromagnetic pulses to control the flux, the charge or the phase difference across a Josephson junction (Makhlin *et al.*, 2001). A generic superconducting qubit can be described by the Hamiltonian $\hat{H}_q = -\frac{1}{2}\epsilon\hat{\sigma}_z - \frac{1}{2}\Delta\hat{\sigma}_x$, where ϵ and Δ denote the ‘longitudinal’ and ‘transversal’ parameters of the corresponding qubit, and σ_i are the usual Pauli matrices (Leggett *et al.*, 1987). The charge qubit has

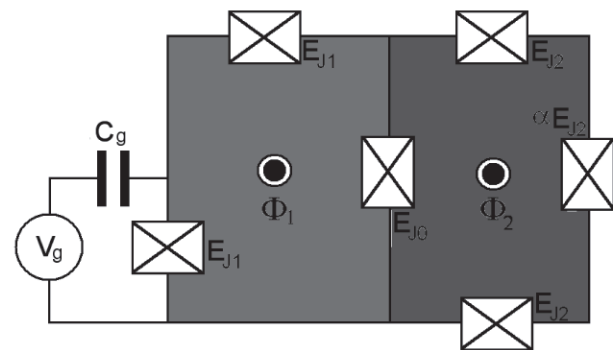


FIG. 7 Hybrid quantum circuit: charge (left) and flux (right) qubits are effectively coupled due to the Josephson junction E_{J0} . E_{Ji} denotes the Josephson energy of each junction (crossed boxes). The charge ($i = 1$) and the flux ($i = 2$) qubits are crossed by externally controlled magnetic fluxes Φ_i (Montes *et al.*, 2009).

the advantage of a more flexible controllability via external parameters: it can be conveniently controlled by a voltage gate or an applied magnetic flux (Makhlin *et al.*, 2001). These external control parameters appear in the longitudinal (σ_z) and transverse (σ_x) terms of the circuit’s reduced Hamiltonian. For the flux qubit, the longitudinal term can be controlled by the applied magnetic flux, but it can be harder to control the transversal term via an external parameter (Makhlin *et al.*, 2001).

In (Montes *et al.*, 2009), a hybrid quantum circuit, a system that couples a charge and a flux qubit, as schematically shown in Figure 7, has been studied. This

exhibits an effective interaction due to a Josephson junction (a device with nonlinear inductance and no energy dissipation) that binds them. This system has been proposed in order to control the transversal term of the flux qubit with the charge qubit. The interaction between the qubits gives rise to an effective $\sigma_x \otimes \sigma_z$ geometric term with a strength that allows the realisation of controlled qubit gates for quantum computing (Montes *et al.*, 2009). Aside of their potential use as the building blocks of quantum computers, superconducting qubits are fundamental in the understanding of basic macroscopic quantum coherence related phenomena (Makhlin *et al.*, 2001; Clarke & Wilhelm, 2008).

Other solid-state based proposals involve quantum information processing with large nuclear spins in GaAs semiconductors (Leuenberger *et al.*, 2002), nanotubes and fullerenes (Ardavan *et al.*, 2003), molecular magnets (Leuenberger *et al.*, 2001), single molecule arrays (Reina *et al.*, 2004), graphene quantum dots (Trauzettel *et al.*, 2007), and organic polymers (Mujica *et al.*, 2009).

On a different front, there are fundamental coherence control experiments being performed in soft-condensed matter nanostructures, where there have been some recent breakthroughs. In particular, regarding the quantum coherence of biomolecular excitons, over the past few years has been argued that quantum coherent dynamics at the initial stages of photosynthesis in complex biomolecular structures promote the efficiency of energy transfer from the light-harvesting antenna complexes to the chemical reaction centres (Brixner *et al.*, 2005; Herek *et al.*, 2002). This hypothesis has been recently boosted by experimental results which reveal long-lived quantum coherent excitonic dynamics in the energy transfer among bacteriochlorophylls in photosynthetic complexes (Engel *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2007). This said, it is often claimed that coherent dynamical processes in nanostructures for quantum information processing are severely hindered by non-Markovian decoherence (Weiss, 2008; Zurek, 2002; Alicki *et al.*, 2002; Makri & Makarov, 1995). By using a numerically exact real-time path-integral approach (Makri & Makarov, 1995), Thorwart *et al.* (Thorwart *et al.*, 2008; Eckel *et al.*, 2009) have shown that quantum coherence of excitons created in photosynthetic biomolecular complexes can be sustained over exceedingly long times due to a constructive role played by the non-Markovian surrounding environment. They provided evidence that a sluggish quantum bath helps to sustain coherence in a single pair of Förster coupled excitons compared to a Markovian environment. Furthermore, it has also been shown that the quantum entanglement of excitations in two pairs of coupled chromophores is more

stable against decoherence generated by a slow bath, and that the entanglement robustness persists up to surprisingly high temperatures (Thorwart *et al.*, 2008). These results can explain why naturally existing, correlated protein environments help to maintain electronic coherence in light-harvesting complexes and could prove crucial in the artificial design of robust multipartite biomolecular entanglement or quantum memories (Kroutvar *et al.*, 2004; Rabi *et al.*, 2006) for the control and conditional dynamics of qubits.

Gating and decoherence time scales

The figure of merit $\mathcal{M} \equiv \tau_{dec}/\tau_{gate}$ for comparing some of the different technologies currently used in quantum information processing is given in Table I. The ratio \mathcal{M} gives an estimation of the largest number of elementary operations that can, in principle, be performed on the register states before decoherence takes over.

The gating time τ_{gate} is the minimum time required to execute an elementary gate. This has been estimated in Table I as $\hbar/\Delta E$, where ΔE is the energy splitting between the qubit states $|0\rangle$, and $|1\rangle$. τ_{dec} is the corresponding qubit phase coherence time.

VI. CONCLUSIONS

A concise review of some of the basic concepts in the field of quantum information and quantum computation

Quantum hardware	τ_{gate} (s)	τ_{dec} (s)	\mathcal{M}
Trapped ions ^a	10^{-5}	10^{-1}	10^4
Optical cavities ^b	10^{-14}	10^{-5}	10^9
Nuclear spin ^c	10^{-3}	10^4	10^7
Cavity QED ^d	10^{-9}	10^{-3}	10^6
Electron spin ^e	10^{-7}	10^{-3}	10^4
QDs excitons ^f	10^{-14}	10^{-10}	10^4

^aBlatt & Wineland, 2008; Monroe *et al.*, 1995; Sackett *et al.*, 2000

^bBloch, 2008; Mandel *et al.*, 2003

^cJones *et al.*, 1998; Luenbeeger *et al.*, 2002

^dTurchete *et al.*, 1995; Rauschenbeutel *et al.*, 1999

^eVrijen *et al.*, 2000; Kroutvar *et al.*, 2004

^fBorri, 2001; Birkedal *et al.*, 2001; Robledo *et al.*, 2008

TABLE I Characteristic ‘gating,’ and dephasing time scales for comparing different physical systems currently used as qubits. The figure of merit \mathcal{M} gives an estimation of the number of qubit operations that could be realised on a qubit register before it decoheres.

has been presented. Quantum registers, through to the universal gate for building quantum circuits that are universal for quantum computation, were introduced. It has been shown how two-qubit gates suffice for quantum computation, and the power of the quantum circuit representation for entangling and disentangling quantum states was emphasised, in terms of both *local* and *global* control quantum computing. This led to a discussion of the no-cloning theorem and its interesting implications. The basic formulations of one-way quantum computation, and holonomic or geometric computation—alternative approaches for quantum computation—were also introduced. Following this, the power of quantum entanglement as a communication resource was highlighted in order to describe some practical applications, such as quantum teleportation, quantum cryptography, dense coding, and quantum data compression. The problem of entanglement quantification was discussed and some examples of entanglement measures were given. Deutsch’s concept of quantum parallelism was introduced in order to gain insight into the potential for efficiently solving certain classically intractable algorithms. After this, two processes fundamental to QIP, decoherence and ‘recoherence’ (e.g., quantum error correction), were discussed. The main qubit systems currently employed for the processing of quantum information were also described.

As was shown, there have been some successful demonstrations of few-qubit manipulations, and there exists a vast and still growing range of proposals for realizing quantum information processing. This intense experimental and theoretical research activity has been ongoing for more than a decade. The way forward is still very open—the key routes to few-qubit and large-scale QIP, which could well differ, have yet to be identified. In this respect, proposals and implementations of hybrid systems that combine the so-called stationary (matter) and flying (photon) qubits seem a perspective worth pushing forward.

Whether the task of building a true (large scale) quantum computer is ever going to be achieved remains an open question. The final goal of building a quantum computer will be extremely challenging, with basic physical mechanisms needing to be addressed and fully understood. As has been shown, due to their contact with their reservoirs, the interacting qubit networks for QIP are subjected to irreversible dissipation mechanisms which spoil the required coherent qubit dynamics. Such hardware-dependent noise sources are a major hurdle that have to be understood and overcome if the dream of efficient large scale quantum computing is to become a reality.

Acknowledgements. The author would like to thank G. Paz-Silva for discussions on entanglement

measures (Sec. III.B), and J. D. Jaramillo for help with the illustrations of Sec. II.C. JHR is grateful to the Departamento de Física of the Universidad del Valle, Colciencias (Grant No. 1106-452-21296), and the DAAD-PROCOL Program for financial support.

APPENDIX A: The no-cloning theorem

The no-cloning theorem (Wootters & Zurek, 1982) is a consequence of the fundamental principles of quantum physics. It leads to interesting applications such as quantum cryptography (see Subs. III.F). To prove the “no-cloning theorem” it suffices to note that, in order to generate a copy of an arbitrary quantum state $|\Psi\rangle$, we should be able to realise a unitary transformation U that produces the evolution $U(|\Psi\rangle|0\rangle) = |\Psi\rangle|\Psi\rangle$. Consider the state $|\Psi'\rangle$ such that $|\Psi'\rangle \neq |\Psi\rangle$. Hence, $U(|\Psi'\rangle|0\rangle) = |\Psi'\rangle|\Psi'\rangle$. Next, we make $|\Phi\rangle = (|\Psi\rangle + |\Psi'\rangle)/\sqrt{2}$, obtaining $U(|\Phi\rangle|0\rangle) = (|\Psi\rangle|\Psi\rangle + |\Psi'\rangle|\Psi'\rangle)/\sqrt{2} \neq |\Phi\rangle|\Phi\rangle$, which fails the cloning operation since U must not depend on any chosen $|\Phi\rangle$. From this we can state that unless we know beforehand the state of a qubit (which is to be represented by classical information), it is impossible to generate copies of a quantum state faithfully.

APPENDIX B: Cluster and graph states

A *cluster state* is a type of highly entangled state of multiple qubits. Cluster states are generated in lattices of qubits with Ising type interactions. A cluster C is a connected subset of a d -dimensional lattice, and a cluster state is a pure state of the qubits located on C . They are different from other types of entangled states such as GHZ states or W states because it is more difficult to eliminate quantum entanglement (via projective measurements) in the case of cluster states. Another way of thinking of cluster states is as a particular instance of graph states, where the underlying graph is a connected subset of a d -dimensional lattice. To define a cluster state, the eigenstates $|U\rangle_G = \sigma_z^U |G\rangle$ of K_a^G , according to the eigenvalues U_a , are introduced:

$$K_a^G |U\rangle_G = (-1)^{U_a} |U\rangle_G, \quad (\text{B1})$$

or, in terms of the symmetric Γ ($N \times N$) matrix of elements

$$\Gamma_{ab} = \begin{cases} 1, & \text{if } \{a, b\} \in E, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (\text{B2})$$

For this we define a *neighbourhood* as the set of adjacent vertices to a given vertex, and denote it as

$$N_a := \{b \in V \mid \{a, b\} \in E\}, \quad (\text{B3})$$

for a given vertex $a \in V$. The number of neighbours $|N_a|$ is the vertex *grade* of vertex a (**Raussendorf & Briegel, 2001**). Thus, we write for the cluster state

$$K_a^G \equiv \sigma_x^{(a)} \prod_{b \in V} (\sigma_z^{(b)})^{\Gamma_{ab}} = \sigma_x^a \otimes \sigma_z^{N_a} = \sigma_x^a \otimes \sigma_z^{\Gamma_a}. \quad (\text{B4})$$

A *graph* $G = (V, E)$ is a collection of vertices V , and a set of edges (one-dimensional line segments joining two vertices) E . A graph state is usually represented by a two-dimensional diagram, where each vertex is represented by a point and the edges by lines that join two vertices. Formally, a graph state is defined as a pair

$$|G\rangle = (V, E) = \prod_{\{a,b\} \in E} U_{ab} |+\rangle^{\otimes V}, \quad (\text{B5})$$

where the operator $U_{a,b}$ is the interaction between the two vertices (qubits) a, b

$$U_{ab} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad (\text{B6})$$

and $|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$. An alternative and equivalent definition is as follows. Define an operator K_a^G for each vertex a of G :

$$K_a^G \equiv \sigma_x^{(a)} \prod_{b \in N_a} \sigma_z^{(b)}, \quad (\text{B7})$$

Where N_a is the neighborhood of a (the set of all b such that $(a, b) \in E$), and σ_i are the pauli matrices. Then, the graph state $|G\rangle$ is defined as the simultaneous eigenstate of the $N = |V|$ operators $\{K_a^G\}_{a \in V}$ with eigenvalue 1: $K_a^G |G\rangle = |G\rangle$.

APPENDIX C: Examples of QEC codes

1. Example 1: Bit-flip σ_x -error-correction

Suppose Q has three qubits, and a has two qubits. Let M_s be the bit-flip error generator σ_x . In this case, there are two orthonormal recoverable states: $|000\rangle$, and $|111\rangle$, thus $\dim(\mathcal{RH}) = 2$. The state $|\Phi\rangle = \alpha|000\rangle + \beta|111\rangle$ is a general recoverable state of Q . The noisy environment entangles the qubit register as follows:

$$|e_0\rangle(\alpha|000\rangle + \beta|111\rangle) + |e_1\rangle(\alpha|001\rangle + \beta|110\rangle) + |e_2\rangle(\alpha|010\rangle + \beta|101\rangle) + |e_3\rangle(\alpha|100\rangle + \beta|011\rangle). \quad (\text{C1})$$

In this case, the syndrome extraction A consists of the following four CNOT gates, with “ Q ” (“ a ”) as the control (target) system: $\text{CNOT}_{14}\text{CNOT}_{24}\text{CNOT}_{15}\text{CNOT}_{35}$. After this A -operation, the whole register “ $Q + E + a$ ” is left in the state

$$|e_0\rangle|00\rangle_a(\alpha|000\rangle + \beta|111\rangle) + |e_1\rangle|01\rangle_a(\alpha|001\rangle + \beta|110\rangle) + |e_2\rangle|10\rangle_a(\alpha|010\rangle + \beta|101\rangle) + |e_3\rangle|11\rangle_a(\alpha|100\rangle + \beta|011\rangle). \quad (\text{C2})$$

Next, a measurement of the ancilla a is performed. Hence, conditional to the measurement result, the following simple operations over the Q -qubits project back the system onto the noise-free state $|\Phi\rangle$: “do nothing,” $\sigma_x^{(1)}$, $\sigma_x^{(2)}$, $\sigma_x^{(3)}$, if the ancilla measurement gives 00, 01, 10, or 11, respectively. As said, in the above procedure, the measurement step can be avoided by using Toffoli gates (see below), but in this case, with “ a ” (“ Q ”) as the control (target) (**Steane, 1996(A, B, C)**).

2. Example 2: Phase-flip σ_z -error-correction

A single-phase-error-correcting-code that uses three qubits has the following two quantum codewords (encoding)

$$H(|000\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \equiv |\bar{0}\bar{0}\bar{0}\rangle \quad (\text{C3})$$

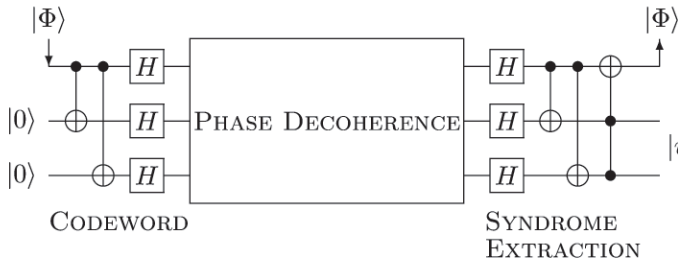
$$H(|111\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) \equiv |\bar{1}\bar{1}\bar{1}\rangle \quad (\text{C4})$$

Next, let’s illustrate how to perform QEC without realising the final ancilla measurement operation, i.e., by means of quantum gates only. Suppose one is given the state $|\Phi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ (system “ Q ”) that needs to be protected against phase decoherence (in this example it is assumed that only single-qubit dephasing errors occur). In so doing, an ancilla “ a ” of two qubits is introduced. Next, the register “ $Q + a$ ” is encoded following the codeword given before. For illustrative purposes, let’s assume that the environment interaction ‘dephases’ the second qubit only. Then, the decohered state becomes (the normalisation factor $2^{-3/2}$ has been ommitted)

$$\alpha(|0\rangle + |1\rangle)(|0\rangle|e_0\rangle + |1\rangle|e_1\rangle)(|0\rangle + |1\rangle) + \beta(|0\rangle - |1\rangle)(|0\rangle|e_0\rangle - |1\rangle|e_1\rangle)(|0\rangle - |1\rangle). \quad (\text{C5})$$

The syndrome extraction A (decoding) is then built from two CNOT gates and a Toffoli gate, as shown in the schematic below, thus correcting the phase error and recovering the original state $|\Phi\rangle$. Note that while $|\Phi\rangle$ is a noise-free state, the final ancilla state

$|u\rangle_a = |00\rangle(|e_0\rangle + |e_1\rangle) + |10\rangle(|e_0\rangle - |e_1\rangle)$ becomes entangled with the environment.



3. Example 3: σ_x , σ_z , & $\sigma_x\sigma_z$ -error correction

The construction of codes following the above recipe are referred to in the literature as CSS codes (for Calderbank, Shor, and Steane). This method leads to a single-error-correcting quantum code that has the following parameters: $[[n, 2k - n, d]] = [[7, 1, 3]]$. The notation indicates that the length of the codewords is n , there are 2^{2k-n} orthonormal quantum codewords, and d is the ‘minimum distance’ of the code (the minimum number of places in which each word differs from all others). Hence, the prescribed code requires 7 qubits in order to store and protect a single qubit. The simplest CSS code is obtained from the classical Hamming code, and has the following two orthogonal codewords (Steane, 1996(A, B, C))

$$\begin{aligned} |c_0\rangle &\equiv |0000000\rangle + |1010101\rangle + |0110011\rangle + |1100110\rangle + \\ &\quad |0001111\rangle + |1011010\rangle + |0111100\rangle + |1101001\rangle, \\ |c_1\rangle &\equiv \sigma_x^{(1111111)} |c_0\rangle. \end{aligned} \quad (C6)$$

The superscripts indicate that the bit-flip operation must be performed on each qubit of each single codeword. It is worth pointing out that the above description is not the most general possible theory of QEC. The most general treatment of QEC codes has been developed in (Gottesman, 1996; Knill & Laflamme, 1997; Calderbank *et al.*, 1997). It turns out that there are more efficient quantum code constructions. In fact, Laflamme *et al.* (Laflamme *et al.*, 1996) and Bennett *et al.* (Bennett *et al.*, 1996) have provided a 5-qubit single-error-correcting code that produces the same control as CSS’s code, but with the advantage that it requires only 5 qubits to do the job. This $[[5, 1, 3]]$ code has been referred to as a “perfect quantum code” (Laflamme *et al.*, 1996; Bennett *et al.*, 1996; Calderbank *et al.*, 1997). Hence, an arbitrary quantum state $|\Phi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ that is encoded by using 4 additional ancillary qubits (prepared in the state $|0\rangle$), using a $[[5, 1, 3]]$ encoding, can evolve in the presence of a general quantum noise

(σ_x, σ_y , and $-i\sigma_z$ -errors) in such a way that by the end of the computation it can be extracted completely free of noise from the 5-qubit system: that is, if at any stage of the computation, something ‘wrong’ happened to its coherence, the encoding guarantees that by the end of the computation, $|\Phi\rangle$ is error-free, and completely disentangled from the environment!

References

- Alicki R., M. Horodecki, P. Horodecki & R. Horodecki. 2002. Dynamical Description of Quantum Computing: Generic Nonlocality of Quantum Noise. *Phys. Rev. A* **65**: 062101-62111.
- Amico L., R. Fazio, A. Osterloh & V. Vedral. 2008. Many-Body Entanglement. *Rev. Mod. Phys.* **80**: 517-576.
- Ardavan A., M. Austwick, S. Benjamin, A. Briggs, T. Dennis, A. Ferguson, D. Hasko, M. Kanai, A. Khlobystov, B. Lovett, G. Morley, R. Oliver, D. Pettifor, K. Porfyrakis, J. H. Reina, J. Rice, J. Smith, R. Taylor, D. Williams, C. Adelman, H. Mariette & R. J. Hamers. 2003. Nanoscale Solid-State Quantum Computing. *Phil. Trans. R. Soc. London A* **361**: 1473-1485.
- Aspect A., J. Dalibard & G. Roger. 1982. Experimental Test of Bell’s Inequalities Using Time-Varying Analyzers. *Phys. Rev. Lett.* **49**: 1804-1807.
- Averin D. 1998. Adiabatic Quantum Computation with Cooper Pairs. *Solid State Commun* **105**: 659-664.
- Barenco A. 1995. A Universal Two-Bit Gate for Quantum Computation. *Proc. R. Soc. Lond. A* **449**: 679-683.
- Barenco A., C. Bennett, R. Cleve, D. DiVincenzo, N. Margolus, P. Shor, T. Sleator, J. Smolin & H. Weinfurter. 1995(A). Elementary Gates for Quantum Computation. *Phys. Rev. A* **52**: 3457-3467.
- Barenco A., D. Deutsch, A. Ekert & R. Jozsa. 1995(B). Conditional Quantum Dynamics and Logic Gates. *Phys. Rev. Lett.* **74**: 4083-4086.
- Barenco A. & A. Ekert. 1995. Dense Coding Based on Quantum Entanglement. *J. Mod. Opt.* **42**: 1253-1259.
- Barrett, M. D. et al. J. Chiaverini, T. Schaetz, J. Britton, W. M. Itano, J. D. Jost, E. Knill, C. Langer, D. Leibfried, R. Ozeri & D. J. Wineland. 2004. Deterministic Quantum Teleportation of Atomic Qubits. *Nature* **429**: 737-739.
- Bastidas V., J. H. Reina & T. Brandes. 2009. Non-Equilibrium Entanglement in a Driven Dicke Model. *Journal of Physics: Conf. Series* **167**: 012063/1-5.
- Bell J. 1964. On the Einstein Podolsky Rosen Paradox. *Physics* **1**: 195-200.
- Bell J. 1987. *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*. Cambridge University Press.
- Bennett C. & G. Brassard. 1984. Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing. *Proc. IEEE Int. Conference on Computers, Systems and Signal Processing*. Bangalore, India (IEEE, New York): 175-179.

- Bennett C. & G. Brassard.** 1989. The Dawn of a New Era for Quantum Cryptography: The Experimental Prototype is Working! SIGACT news **20**: 78-82.
- Bennett C., G. Brassard & A. Ekert** 1992(A). Quantum Cryptography. Scientific American **267**: 50-57.
- Bennett C., G. Brassard & N. Mermin.** 1992(B). Quantum Cryptography Without Bell's Theorem. Phys. Rev. Lett. **68**: 557-559.
- Bennett C. & S. Wiesner.** 1992(C). Communication via One- and Two-Particle Operators on Einstein-Podolsky-Rosen States. Phys. Rev. Lett. **69**: 2881-2884.
- Bennett C., G. Brassard, C. Crépeau, R. Jozsa, A. Peres & W. Wootters.** 1993. Teleporting an Unknown Quantum State Via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels. Phys. Rev. Lett. **70**: 1895-1899.
- Bennett C.** 1995. Quantum Information and Computation. Physics Today **48**: 24-30.
- Bennett C. H., D. P. DiVincenzo, J. Smolin & W. K. Wootters.** 1996. Mixed-State Entanglement and Quantum Error Correction. Phys. Rev. A **54**: 3825-3851.
- Bennett C. H., C. A. Fuchs & J. A. Smolin.** 1997. Proc. QCM96, ed. by O. Hirota, A. S. Holevo and C. M. Caves, New York: Plenum, pp. 79. E-print quant-ph/9611006.
- Bennett C. & D. DiVincenzo.** 2000. Quantum Information and Computation. Nature **404**: 247-255.
- Bennett C. H., S. Popescu, D. Rohrlich, J. A. Smolin & A. V. Thapliyal.** 2001. Exact and Asymptotic Measures of Multipartite Pure-State Entanglement. Phys. Rev. A **63**: 012307/1-12.
- Benioff P.** 1982(A). Quantum Mechanical Hamiltonian Models of Turing Machines. J. Stat. Phys. **29**: 515-546.
- Benioff P.** 1982(B). Quantum Mechanical Models of Turing Machines That Dissipate No Energy. Phys. Rev. Lett. **48**: 1581-1585.
- Benjamin S. C. & P. Hayden.** 2001(A). Comment on "Quantum Games and Quantum Strategies". Phys. Rev. Lett. **87**: 069801. E-print quant-ph/0003036.
- Benjamin S. C. & P. Hayden.** 2001(B). Multiplayer Quantum Games. Phys. Rev. A **64**: 030301-30304(R). E-print quant-ph/0007038.
- Benjamin S. C.** 2000. Schemes for Parallel Quantum Computation Without Local Control of Qubits. Phys. Rev. A **61**: 020301-20304(R).
- Benjamin S. C.** 2002. Quantum Computing Without Local Control of Qubit-Qubit Interactions. Phys. Rev. Lett. **88**: 017904/1-4.
- Benjamin S. C., B. Lovett & J. H. Reina.** 2004. Optical Quantum Computation with Perpetually Coupled Spins. Phys. Rev. A **70**: 060305(R)/1-4.
- Berry M.** 1984. Quantal Phase Factors Accompanying Adiabatic Changes. Proc. Roy. Soc. A **392**: 45-57.
- Biolatti E., R. Iotti, P. Zanardi & F. Rossi.** 2000. Quantum Information Processing with Semiconductor Macroatoms. Phys. Rev. Lett. **85**: 5647-5650.
- Birkedal D., K. Leosson & J. Hvam.** 2001. Long Lived Coherence in Self-Assembled Quantum Dots. Phys. Rev. Lett. **87**: 227401/404.
- Blatt R. & D. Wineland.** 2008. Entangled States of Trapped Atomic Ions. Nature **453**: 1008-1015.
- Bloch I.** 2008. Quantum Coherence and Entanglement with Ultracold Atoms in Optical Lattices. Nature, **453**: 1016-1022.
- Borri P., W. Langbein, S. Schneider, U. Woggon, R. Sellin, D. Ouyang & D. Bimberg.** 2001. Ultralong Dephasing Time in InGaAs Quantum Dots. Phys. Rev. Lett. **87**: 157401/404.
- Bouwmeester, D., J.-W. Pan, K. Mattle, M. Eibl, H. Weinfurter & A. Zeilinger.** Experimental Quantum Teleportation. Nature **390**: 575-579.
- Brassard G., S. L. Braunstein & R. Cleve.** 1998. Teleportation as a Quantum Computation. Physica D **120**: 43-47.
- Braunstein S., A. Mann & M. Revzen.** 1992. Maximal Violation of Bell Inequalities for Mixed States. Phys. Rev. Lett. **68**: 3259-3261.
- Brennen G., C. Caves, P. Jessen & I. Deutsch.** 1999. Quantum Logic Gates in Optical Lattices. Phys. Rev. Lett. **82**: 1060-1063.
- Briegel H. J. & R. Raussendorf.** 2001. Persistent Entanglement in Arrays of Interacting Particles. Phys. Rev. Lett. **86**: 910-913.
- Brixner T., J. Stenger, H. M. Vaswani, M. Cho, R. E. Blankenship & G. R. Fleming.** 2005. Two-Dimensional Spectroscopy of Electronic Couplings in Photosynthesis. Nature **434**: 625-628.
- Browne D. E. & T. Rudolph.** 2005. Resource-Efficient Linear Optical Quantum Computation. Physical Review Letters **95**: 010501/1-4.
- Burkard G., D. Loss & D. DiVincenzo.** 1999. Coupled Quantum Dots as Quantum Gates. Phys. Rev. B **59**: 2070-2078.
- Calderbank A., E. Rains, P. Shor & N. Sloane.** 1997. Quantum Error Correction and Orthogonal Geometry. Phys. Rev. Lett. **78**: 405-408.
- Calderbank R. & P. Shor.** 1996. Good Quantum Error-Correcting Codes Exist. Phys. Rev. A **54**: 1098-1115.
- Carollo A., I. Fuentes-Guridi, M. Franca Santos & V. Vedral.** 2003. Geometric Phase in Open Systems. Phys. Rev. Lett. **90**: 160402/1-4.
- Carollo A., I. Fuentes-Guridi, M. Franca Santos & V. Vedral.** 2004. Spin-1/2 Geometric Phase Driven by Decohering Quantum Fields. Phys. Rev. Lett. **92**: 020402/1-4.
- Carollo A., M. Franca Santos & V. Vedral.** 2006. Coherent Quantum Evolution via Reservoir Driven Holonomies. Phys. Rev. Lett. **96**: 020403/1-4.
- Cerf N. & C. Adami.** 1997. Negative Entropy and Information in Quantum Mechanics. Phys. Rev. Lett. **79**: 5194-5197.
- Chen Y.-A., S. Chen, Z.-S. Yuan, B. Zhao, C.-S. Chu, J. Schmiedmayer & J.-W. Pan.** 2008. Memory-built-in Quantum Teleportation with Photonic and Atomic Qubits. Nature Physics **4**: 103-107.
- Chiaverini J., D. Leibfried, T. Schaetz, M. D. Barrett, R. B. Blakestad, J. Britton, W. M. Itano, J. D. Jost, E. Knill, C.**

- Langer, R. Ozeri & D. J. Wineland.** 2004. Realization of Quantum Error Correction. *Nature* **432**: 602-605.
- Christandl M. & A. Winter.** 2004. Squashed Entanglement: An Additive Entanglement Measure. *Math. Phys.* **45**: 829-840.
- Chuang I., L.Vandersypen, X. Zhou, D. Leung & S. Lloyd.** 1998(A). Experimental Realization of a Quantum Algorithm. *Nature* **393**: 143-146.
- Chuang I., N. Gershenfeld & M. Kubinec.** 1998(B). Experimental Implementation of Fast Quantum Searching. *Phys. Rev. Lett.* **80**: 3408-3411.
- Cirac J., P. Zoller, H. Kimble & H. Mabuchi.** 1997. Quantum State Transfer and Entanglement Distribution among Distant Nodes in a Quantum Network. *Phys. Rev. Lett.* **78**: 3221-3224.
- Cirac J., T. Pellizzari & P. Zoller.** 1996. Enforcing Coherent Evolution in Dissipative Quantum Dynamics. *Science* **273**: 1207-1210.
- Cirac J. & P. Zoller.** 1995. Quantum Computations With Cold Trapped Ions. *Phys. Rev. Lett.* **74**: 4091-4094.
- Cirac J. & P. Zoller.** 2000. A Scalable Quantum Computer With Ions in an Array of Microtraps. *Nature* **404**: 579-581.
- Clarke J. & F. K. Wilhelm.** 2008. Superconducting Quantum Bits. *Nature* **453**: 1031-1042.
- Cleve R., A. Ekert, C. Macchiavello & M. Mosca.** 1998. Quantum Algorithms Revisited. *Proc. R. Soc. Lond. A* **454**: 339-354.
- Cocks C.** 1973. A Note on Non-Secret Encryption. Tech. report. Communications-Electronics Security Group. United Kingdom.
- Cory D., A. Fahmy & T. Havel.** 1997. Ensemble Quantum Computing by NMR Spectroscopy. *Proc. Natn. Acad. Sci. USA* **94**: 1634-1639.
- d'Espagnat B.** 1976. *Conceptual Foundations of Quantum Mechanics.* Benjamin, Reading, Massachusetts.
- Deutsch D.** 1985. Quantum Theory, the Church-Turing Principle and the Universal Quantum Computer. *Proc. R. Soc. London A* **400**: 97-117.
- Deutsch D.** 1989. Quantum Computational Networks. *Proc. R. Soc. Lond. A* **425**: 73-90.
- Deutsch D., A. Barenco & A. Ekert.** 1995. Universality in Quantum Computation. *Proc. R. Soc. Lond. A* **449**: 669-677.
- Deutsch D. & R. Jozsa.** 1992. Rapid Solution of Problems by Quantum Computation. *Proc. R. Soc. London A* **439**: 553-558.
- DiVincenzo D.** 1995. Two-Bit Gates are Universal for Quantum Computation. *Phys. Rev. A* **51**: 1015-1022.
- Duan L., J. Cirac & P. Zoller.** 2001. Geometric Manipulation of Trapped Ions for Quantum Computation. *Science* **292**: 1695-1697.
- Dür W., G. Vidal & J. I. Cirac.** 2000. Three Qubits Can be Entangled in Two Inequivalent Ways. *Phys. Rev. A* **62**: 062314/1-12.
- Eckel J., J. H. Reina & M. Thorwart.** 2009. Coherent Control of an Effective Two-Level System in a Non-Markovian Biomolecular Environment. To appear in *New J. Phys.*, Special Issue: Focus on "Quantum Dissipation in Unconventional Environments". Eprint cond-mat arXiv:0903.2936.
- Einstein A., B. Podolsky & N. Rosen.** 1935. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Phys. Rev.* **47**: 777-780.
- Eisert J., M. Wilkens & M. Lewenstein.** 1999. Quantum Games and Quantum Strategies. *Phys. Rev. Lett.* **83**: 3077-3080.
- Eisert J. & M. Wilkens.** 2000. Quantum Games. Eprint quant-ph/0004076.
- Ekert A.** 1991. Quantum Cryptography Based on Bell's Theorem. *Phys. Rev. Lett.* **67**: 661-663.
- Ekert A., M. Ericsson, P. Hayden, H. Inamori, J. Jones, D. Oi & V. Vedral.** 2000(A). Geometric Quantum Computation. *J. Mod. Opt.* **47**: 2501-2513.
- Ekert A., P. Hayden & H. Inamori.** 2000(B). Basic Concepts in Quantum Computation. E-print arXiv:quant-ph/0011013v1.
- Ekert A. & C. Macchiavello.** 1996. Quantum Error Correction for Communication. *Phys. Rev. Lett.* **77**: 2585-2588.
- Ekert A. & R. Jozsa.** 1996. Quantum Computation and Shor's Factoring Algorithm. *Rev. Mod. Phys.* **68**: 733-753.
- Engel G.S., T. R. Calhoun, E. L. Read, T.-K. Ahn, T. Mancal, Y.-C. Cheng, R. E. Blankenship & G. R. Fleming.** 2007. Evidence for Wavelike Energy Transfer through Quantum Coherence in Photosynthetic Systems. *Nature* **446**: 782-786.
- Falci G., R. Fazio, G. Palma, J. Siewert & V. Vedral.** 2000. Detection of Geometric Phases in Superconducting Nanocircuits. *Nature* **407**: 355-358.
- Feynman R.** 1982. Simulating Physics with Computers. *Int. J. Theor. Phys.* **21**: 467-488.
- Feynman R.** 1985. Quantum Mechanical Computers. *Opt. News* **11**: 11-46.
- Fushman I., D. Englund, A. Faraon, N. Stoltz, P. Petroff & J. Vukovi.** 2008. Controlled Phase Shifts with a Single Quantum Dot. *Science* **320**: 769-772.
- Galindo A. & P. Pascual.** 1990. *Quantum Mechanics II.* Springer-Verlag, Berlin.
- Gershenfeld N. & Chuang I.** 1997. Bulk Spin-Resonance Quantum Computation. *Science* **275**: 350-356.
- Giamarchi T., C. Ruegg & O. Tchernyshyov.** 2008. Bose-Einstein Condensation in Magnetic Insulators. *Nature Physics* **4**: 198-204.
- Gisin N., G. Ribordy, W. Tittel & H. Zbinden.** 2002. Quantum Cryptography. *Reviews of Modern Physics* **74**: 145-195.
- Gottesman D.** 1996. Class of Quantum Error-Correcting Codes Saturating the Quantum Hamming Bound. *Phys. Rev. A* **54**: 1862-1868.
- Greenberger D., M. Horne, A. Shimony & A. Zeilinger.** 1990. Bell's Theorem Without Inequalities. *Am. J. Phys.* **58**: 1131-1143.
- Greenberger D., M. Horne & A. Zeilinger.** 1989. Going Beyond Bell's Theorem. In "Bell's theorem, Quantum Theory, and

- Conceptions of the Universe". E. Kafatos (ed.). Kluwer, Dordrecht. The Netherlands. 69-72.
- Greiner M., O. Mandel, T. Esslinger, T. Hänsch & I. Bloch.** 2002. Quantum Phase Transition from a Superfluid to a Mott Insulator in a Gas of Ultracold Atoms. *Nature* **415**: 39-44.
- Grover L.** 1997. Quantum Mechanics Helps in Searching for a Needle in a Haystack. *Phys. Rev. Lett.* **79**: 325-328.
- Hayden P., M. Horodecki & B. Terhal.** 2001. The Asymptotic Entanglement Cost of Preparing a Quantum State. *J. Phys. A: Math. Gen.* **34**: 6891-6898.
- Herek J. L., W.Wohlleben, R. J. Cogdell, D. Zeidler & M. Motzkus.** 2002. Quantum Control of Energy Flow in Light Harvesting. *Nature* **417**: 533-535.
- Horodecki M., P. Horodecki & R. Horodecki.** 1996. Separability of Mixed States: Necessary and Sufficient Conditions. *Phys. Lett. A* **223**: 1-8.
- Horodecki M., P. Horodecki & R. Horodecki.** 2001. Quantum Information: An Introduction to Basic Theoretical Concepts and Experiments. Springer Tracts in Modern Physics.
- Horodecki M.** 2001. Entanglement Measures. *Quant. Inform. Comput.* **1**: 3-26.
- Horodecki M.** 2005. Simplifying Monotonicity Conditions for Entanglement Measures. *Open Syst. Inf. Dyn.* **12**: 231-237.
- Horodecki R., P. Horodecki, M. Horodecki & K. Horodecki.** 2007. Quantum Entanglement. E-print quant-ph/0702225: 1-110.
- Hughes R., D. Alde, P. Dyer, G. Luther, G. Morgan & M. Schauer.** 1995. Quantum Cryptography. *Contemp. Phys.* **36**: 149-163.
- Imamoglu A., D. Awschalom, G. Burkard, D. Di-Vincenzo, D. Loss, M. Sherwin & A. Small.** 1999. Quantum Information Processing Using Quantum Dot Spins and Cavity QED. *Phys. Rev. Lett.* **83**: 4204-4207.
- Jacksch D., H. Briegel, J. Cirac, C. Gardiner & P. Zoller.** 1999. Entanglement of Atoms via Cold Controlled Collisions. *Phys. Rev. Lett.* **82**: 1975-1978.
- Jaramillo J. D. & J. H. Reina.** 2008. Temporal Resources for Global Quantum Computing Architectures. *Brazilian Journal of Physics* **38**: 551-557.
- Jones J., M. Mosca & R. Hansen.** 1998(A). Implementation of a Quantum Search Algorithm on a Quantum Computer. *Nature* **393**: 344-346.
- Jones J., V. Vedral, A. Ekert & G. Castagnoli.** 2000. Geometric Quantum Computation Using Nuclear Magnetic Resonance. *Nature* **403**: 869-871.
- Jones J. & M. Mosca.** 1998(B). Implementation of a Quantum Algorithm on a Nuclear Magnetic Resonance Quantum Computer. *J. Chem. Phys.* **109**: 1648-1653.
- Jozsa R. & B. Schumacher.** 1994. A New Proof of the Quantum Noiseless Coding Theorem. *J. Mod. Optics* **41**: 2343-2349.
- Kamada H., H. Gotoh, J. Temmyo, T. Takagahara & H. Ando.** 2001. Exciton Rabi Oscillation in a Single Quantum Dot. *Phys. Rev. Lett.* **87**: 246401/04.
- Kane B.** 1998. A Silicon-Based Nuclear Spin Quantum Computer. *Nature* **393**: 133-137.
- Kitaev A.** 1997. Fault-Tolerant Quantum Computation by Anyons. E-print quant-ph/9707021.
- Knill E., I. Chuang & R. Laflamme.** 1998. Effective Pure States for Bulk Quantum Computation. *Phys. Rev. A* **57**: 3348-3363.
- Knill E. & R. Laflamme.** 1997. Theory of Quantum Error-Correcting Codes. *Phys. Rev. A* **55**: 900-911.
- Kroutvar M., Y. Ducommun, D. Heiss, M. Bichler, D. Schuh, G. Abstreiter & J. Finley.** 2004. Optically Programmable Electron Spin Memory Using Semiconductor Quantum Dots. *Nature* **432**: 81-84.
- Lo H. & H. Chau.** 1999. Unconditional Security of Quantum Key Distribution Over Arbitrarily Long Distances. *Science* **283**: 2050-2056.
- Laflamme R., C. Miquel, J. Paz & W. Zurek.** 1996. Perfect Quantum Error Correcting Code. *Phys. Rev. Lett.* **77**: 198-201.
- Lee H., Y.-C. Cheng & G. R. Fleming.** 2007. Coherence Dynamics in Photosynthesis: Protein Protection of Excitonic Coherence. *Science* **316**: 1462-1465.
- Leggett A. J., Chakravarty S, Dorsey A T, Fisher M P A, Garg A and Zwerger W.** 1987. Dynamics of the Dissipative Two-State System. *Reviews of Modern Physics* **59**: 1-85.
- Leuenberger M. N. D. Loss, M. Poggio & D. D. Awschalom.** 2002. Quantum Information Processing with Large Nuclear Spins in GaAs Semiconductors. *Phys. Rev. Lett.* **89**: 207601/1-4.
- Leuenberger M. N., M. E. Flatte & D. D. Awschalom.** 2005. Teleportation of Electronic Many-Qubit States Encoded in the Electron Spin of Quantum Dots via Single Photons. *Phys. Rev. Lett.* **94**: 107401/1-4.
- Leuenberger M. N. & D. Loss.** 2001. Quantum Computing in Molecular Magnets. *Nature* **410**: 789-793.
- Loss D. & D. DiVincenzo.** 1999. Quantum Computation with Quantum Dots. *Phys. Rev. A* **57**: 120-126.
- Lovett B., J. H. Reina, A. Nazir, B. Kothari & A. Briggs.** 2003(A). Resonant Energy Transfer and Quantum Computation. *Phys. Lett. A* **315**: 136-142.
- Lovett B., J. H. Reina, A. Nazir & A. Briggs.** 2003(B). Optical Schemes for Quantum Computation in Quantum Dot Molecules. *Phys. Rev. B* **68**: 205319/1-18.
- Lloyd S.** 1995. Almost Any Quantum Logic Gate is Universal. *Phys. Rev. Lett.* **75**: 346-349.
- Lloyd S.** 1993. A Potentially Realizable Quantum Computer. *Science* **261**: 1569-1571.
- Makhlin Y., G. Schön & A. Shnirman.** 1999. Josephson-Junction Qubits with Controlled Couplings. *Nature* **398**: 305-307.
- Makhlin Y., G. Schön & A. Shnirman.** 2001. Quantum-State Engineering with Josephson-Junction Devices. *Rev. Mod. Phys.* **73**: 357-400.
- Makri N. & D. E. Makarov.** 1995. Numerical Path-Integral Techniques for Long-Time Dynamics of Quantum Dissipative Systems. *J. Math. Phys.* **36**: 2430-2457.

- Mandel O., M. Greiner, A. Widera, T. Rom, T. W. Hänsch & I. Bloch.** 2003. Controlled Collisions for Multi-Particle Entanglement of Optically Trapped Atoms. *Nature* **425**: 937.
- Mayers D.** 1998. Unconditional Security in Quantum Cryptography. E-print quant-ph/9802025.
- Mermin N.** 1985. Is the Moon There When Nobody Looks? Reality and the Quantum Theory. *Physics Today* **38**: 38-47.
- Meyer D.** 1999. Quantum Strategies. *Phys. Rev. Lett.* **82**: 1052-1055.
- Meyer D.** 2000. Quantum Games and Quantum Algorithms. E-print quant-ph/0004092.
- Molmer K. & A. Sorensen.** 1999. Multipartite Entanglement of Hot Trapped Ions. *Phys. Rev. Lett.* **82**: 1835-1838.
- Monroe C., D. Meekhof, B. King, W. Itano & D. Wineland.** 1995. Demonstration of a Fundamental Quantum Logic Gate. *Phys. Rev. Lett.* **75**: 4714-4717.
- Montes E., J. Calero & J. H. Reina.** 2009. Dissipative Dynamics of Superconducting Hybrid Qubit Systems. *J. Phys.: Conf. Series* **167**: 012014/1-5.
- Mujica C., J. C. Arce, J. H. Reina & M. Thorwart.** 2009. Molecular Architectures Based on π -Conjugated Block Copolymers for Global Quantum Computation. *J. Phys.: Conf. Series* **167**: 012061/1-5.
- Nakamura Y., Y. Pashkin & J. Tsai.** 1999. Coherent Control of Macroscopic Quantum States in a Single-Cooper-Pair Box. *Nature* **398**: 786-788.
- Nazir A., B. Lovett, S. Barrett, J. H. Reina & A. Briggs.** 2005. Anticrossings in Förster Coupled Quantum Dots. *Phys. Rev. B* **71**: 045334/1-12.
- Nielsen M. A. & J. Kempe.** 2001. Separable States Are More Disordered Globally than Locally. *Phys. Rev. Lett* **86**: 5184-5187.
- Pachos J., P. Zanardi & M. Rasetti.** 1999. Non-Abelian Berry Connections for Quantum Computation. *Phys. Rev. A* **61**: 010305-10308(R).
- Pachos J. & S. Chountasis.** 2000. Optical Holonomic Quantum Computer. *Phys. Rev. A* **62**: 052318-52326.
- Palma G. M., K.-A. Suominen & A. Ekert.** 1996. Quantum Computers and Dissipation. *Proc. Roy. Soc. Lond. A* **452**: 567-584.
- Paz-Silva G. A. & J. H. Reina.** 2009. Total Correlations as Multi-Additive Entanglement Monotones. *Journal of Physics A: Math. Theor.* **42**: 055306/1-12.
- Paz-Silva G. A. & J. H. Reina.** 2008. Characterizing Total Correlations in Multipartite Systems. *Microelectron. J.* **39**: 699-701.
- Paz-Silva G. A. & J. H. Reina.** 2007. Geometric Multipartite Entanglement Measures. *Phys. Lett. A* **365**: 64-69.
- Pellizzari T., S. Gardiner, J. Cirac & P. Zoller.** 1995. Decoherence, Continuous Observation, and Quantum Computing: A Cavity QED Model. *Phys. Rev. Lett.* **75**: 3788-3791.
- Peres A.** 1993. *Quantum Mechanics: Concepts and Methods.* Kluwer, Dordrecht.
- Peres A.** 1996. Separability Criterion for Density Matrices. *Phys. Rev. Lett.* **77**: 1413-1415.
- Peres A.** 1999. All the Bell Inequalities. *Found. Phys.* **29**: 589-614.
- Phoenix S. & P. Townsend.** 1995. Quantum Cryptography: How to Beat the Code Breakers Using Quantum Mechanics. *Contemp. Phys.* **36**: 165-195.
- Plenio M. B. & S. Virmani.** 2007. An Introduction to Entanglement Measures. *Quant. Inf. Comp.* **7**: 1-51. E-print quant-ph/0504163.
- Popescu S.** 1994. Bell's Inequalities Versus Teleportation: What is Nonlocality? *Phys. Rev. Lett.* **72**: 797-799.
- Popescu S.** 1995. Bell's Inequalities and Density Matrices: Revealing Hidden Nonlocality. *Phys. Rev. Lett.* **74**: 2619-2622.
- Popescu S. & D. Rohrlich.** 1997. Thermodynamics and the Measure of Entanglement. *Phys. Rev. A* **56**: 3319-3321(R).
- Preskill J.** 1998. Reliable Quantum Computers. *Proc. R. Soc. Lond. A* **454**: 385-410.
- Pretel A., J. H. Reina & R. W. Aguirre.** 2008. Excitonic Dynamics of a Quantum Dot Coupled to a Laser-Driven Semiconductor Microcavity. *Microelectron. J.* **39**: 682-684.
- Prevedel R., P. Walther, F. Tiefenbacher, P. Böhi, R. Kaltenbaek, T. Jennewein & A. Zeilinger.** 2007. High-Speed Linear Optics Quantum Computing Using Active Feed-Forward. *Nature* **445**: 65-69.
- Privman V., L. Vagner & G. Kventsel.** 1998. Quantum Computation in Quantum-Hall Systems. *Phys. Lett. A* **239**: 141-146.
- Quiroga L. & N. Johnson.** 1999. Entangled Bell and Greenberger-Horne-Zeilinger States of Excitons in Coupled Quantum Dots. *Phys. Rev. Lett.* **83**: 2270-2273.
- Rabi P., D. DeMille, J. Doyle, M. Lukin, R. Schoelkopf & P. Zoller.** 2006. Hybrid Quantum Processors: Molecular Ensembles as Quantum Memory for Solid State Circuits. *Phys. Rev. Lett.* **97**: 033003/1-4.
- Rains E. M.** 1999. Rigorous Treatment of Distillable Entanglement. *Phys. Rev. A* **60**: 173-178.
- Rauschenbeutel A., G. Nogues, S. Osnaghi, P. Bertet, M. Brune, J. Raimond & S. Haroche.** 1999. Coherent Operation of a Tunable Quantum Phase Gate in Cavity QED. *Phys. Rev. Lett.* **83**: 5166-5169.
- Rauschenbeutel A., P. Bertet, S. Osnaghi, G. Nogues, M. Brune, J. Raimond & S. Haroche.** 2001. Controlled Entanglement of Two Field Modes in a Cavity Quantum Electrodynamics Experiment. *Phys. Rev. A* **64**: 050301-50304(R).
- Raussendorf, R., & H. J. Briegel.** 2001. A One-Way Quantum Computer. *Phys. Rev. Lett.* **86**: 5188-5191.
- Raussendorf, R., D. E. Browne & H. J. Briegel.** 2003. Measurement based Quantum Computation on Cluster States. *Phys. Rev. A* **68**: 022312/1-32.
- Reina J. H., L. Quiroga & N. Johnson.** 2000(A). NMR-based Nanostructure Switch for Quantum Logic. *Phys. Rev. B* **62**: 2267-2270(R).
- Reina J. H., L. Quiroga & N. Johnson.** 2000(B). Quantum Entanglement and Information Processing via Excitons in Optically Driven Quantum Dots. *Phys. Rev. A* **62**: 012305/1-8.

- Reina J. H., L. Quiroga & N. Johnson.** 2000(C). Quantum Information Processing in Semiconductor Nanostructures. Invited chapter, Proceedings of the ISI-Accademia dei Lincei Conference on “Conventional and Non Conventional Computing (Quantum and DNA)”. Springer Verlag. E-print quant-ph/0009035.
- Reina J. H. & N. Johnson.** 2000(D). Quantum Teleportation in a Solid-State System. *Phys. Rev. A* **63**: 012303 /1-5.
- Reina J. H., L. Quiroga & N. Johnson.** 2002. Decoherence of Quantum Registers. *Phys. Rev. A* **65**: 032326/1-15.
- Reina J. H., R. Beausoleil, T. Spiller & W. Munro.** 2004. Radiative Corrections and Quantum Gates in Molecular Systems. *Phys. Rev. Lett.* **93**: 250501/1-4.
- Reina J. H. & A. Bririd.** 2008. Path Integral Approach to Dissipation in Solid-State Qubits. *Microelectron. J.* **39**: 696-698.
- Robledo L., J. Elzerman, G. Jundt, M. Atatüre, A. Högele, S. Fält & A. Imamoglu.** 2008. Conditional Dynamics of Interacting Quantum Dots. *Science* **320**: 772-775.
- Riebe, M., H. Häffner, C. F. Roos, W. Hänsel, J. Benhelm, G. P. T. Lancaster, T. W. Körber, C. Becher, F. Schmidt-Kaler, D. F. V. James & R. Blatt.** 2004. Deterministic Quantum Teleportation with Atoms. *Nature* **429**, 734-737.
- Rivest R., A. Shamir & L. Adleman.** 1978. A Method for Obtaining Digital Signatures and Public-Key Cryptosystems. *Communication of the ACM* **21**(2): 120-126.
- Sackett C. A., D. Kielpinski, B. E. King, C. Langer, V. Meyer, C. J. Myatt, M. Rowe, Q. A. Turchette, W. M. Itano, D. J. Wineland & C. Monroe.** 2000. Experimental Entanglement of Four Particles. *Nature* **404**: 256-259.
- Sherson J. F., H. Krauter, R. K. Olsson, B. Julsgaard, K. Hammerer, I. Cirac & E. S. Polzik.** 2006. Quantum Teleportation Between Light and Matter. *Nature* **443**: 557-560.
- Schrödinger E.** 1935. Die Gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik. *Naturwissenschaften* **23**: 807-812; 823-828; 844-849.
- Schumacher B.** 1995. Quantum Coding. *Phys. Rev. A* **51**: 2738-2747.
- Selleri F.** 1989. *Quantum Paradoxes and Physical Reality*. Kluwer. Dordrecht.
- Shapere A. & F. Wilczek.** 1989. *Geometric Phases in Physics*. World Scientific. Singapore.
- Shnirman A., G. Schön & Z. Hermon.** 1997. Quantum Manipulations of Small Josephson Junctions. *Phys. Rev. Lett.* **79**: 2371-2374.
- Shor P.** 1994. Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring. Proceedings of the 35th Annual Symposium on the Foundations of Computer Science. IEEE Computer Society. Santa Fe. Los Alamitos (CA): 124-134. A revised version can be found in (**Shor**, 1997(A)).
- Shor P.** 1995. Scheme for Reducing Decoherence in Quantum Computer Memory. *Phys. Rev. A* **52**: 2493-2496(R).
- Shor P.** 1997(A). Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer. *SIAM Journal on Computing* **26**: 1484-1509. E-print quant-ph/9508027.
- Shor P.** 1997(B). Fault-tolerant Quantum Computation. 37th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS '96), pp. 56. E-print quant-ph/ 9605011v2.
- Shor P.** 2002. Additivity of the Classical Capacity of Entanglement-Breaking Quantum Channels. *J. Math. Phys.* **43**: 4334-4340. See also the other papers (Vol. 43, Issue 9) of the Special Issue: Quantum Information Theory.
- Shor P.** 2004. Equivalence of Additivity Questions in Quantum Information Theory. *Comm. Math. Phys.* **246**: 453-472.
- Simon D.** 1994. On the Power of Quantum Computation. Proceedings of the 35th Annual Symposium on the Foundations of Computer Science. IEEE Computer Society. Santa Fe. Los Alamitos (CA). 116-123.
- Steane A.** 1996(A). Error Correcting Codes in Quantum Theory. *Phys. Rev. Lett.* **77**: 793-797.
- Steane A.** 1996(B). Multiple-Particle Interference and Quantum Error Correction. *Proc. R. Soc. Lond. A* **452**: 2551-2577.
- Steane A.** 1996(C). Simple Quantum Error-Correcting Codes. *Phys. Rev. A* **54**: 4741-4751.
- Steane A.** 1997. Active Stabilization, Quantum Computation, and Quantum State Synthesis. *Phys. Rev. Lett.* **78**: 2252-2255.
- Steane A.** 1998. Quantum Computing. *Rep. Prog. Phys* **61**: 117-173.
- Terhal B. M.** 2000. Bell Inequalities and the Separability Criterion. *Phys. Lett. A* **271**: 319-326.
- Thorwart M., J. Eckel, J. H. Reina & S. Weiss.** 2009. Enhanced Quantum Entanglement in the Non-Markovian Dynamics of Biomolecular Excitons. To appear in *Chem. Phys. Lett.* E-print arXiv:0808.2906.
- Tittel W., J. Brendel, H. Zbinden & N. Gisin.** 1998. Violation of Bell Inequalities by Photons More Than 10 km Apart. *Phys. Rev. Lett.* **81**: 3563-3566.
- Toffoli T.** 1980. Reversible Computing. *Lecture Notes in Computer Science* 85. Automata, Languages and Programming. Springer. Berlin. 632-644.
- Trauzettel B., D. V. Bulaev, D. Loss & G. Burkard.** 2007. Spin Qubits in Graphene Quantum Dots. *Nature Physics* **3**: 192-196.
- Troiani F., U. Hohenester & E. Molinari.** 2000. Exploiting Exciton-Exciton Interactions in Semiconductor Quantum Dots for Quantum-Information Processing. *Phys. Rev. B* **62**: 2263-2266(R).
- Turchete Q., C. Hood, W. Lange, H. Mabuchi & H. Kimble.** 1995. Measurement of Conditional Phase Shifts for Quantum Logic. *Phys. Rev. Lett.* **75**: 4710-4713.
- Uhlmann A.** 1998. Optimizing Entropy Relative to a Channel or a Subalgebra. *Open Syst. & Inf. Dyn.* **5**: 209-227.
- Vandersypen L., M. Steffen, G. Breyta, C. Yannoni, M. Sherwood & I. Chuang.** 2001. Experimental Realization of Shor's Quantum Factoring Algorithm Using Nuclear Magnetic Resonance. *Nature* **414**: 883-887.
- van der Wal C., A. Haar, F. Wilhelm, R. Schouten, C. Harmans, T. Orlando, S. Lloyd & J. Mooij.** 2000. Quantum Super-

- position of Macroscopic Persistent-Current States. *Science* **290**: 773-777.
- Vedral V., A. Barenco & A. Ekert.** 1995. Quantum Networks for Elementary Arithmetic Operations. *Phys. Rev. A* **54**: 147-153.
- Vedral V. & M. B. Plenio.** 1998. Entanglement Measures and Purification Procedures. *Phys. Rev. A* **57**: 1619-1633.
- Vedral V.** 2008. Quantifying Entanglement in Macroscopic Systems. *Nature* **453**: 1004-1007.
- Vidal G. & R. F. Werner.** 2002. Computable Measure of Entanglement. *Phys. Rev. A* **65**: 032314/1-11.
- Vidal G.** 2000. Entanglement Monotones. *J. Mod. Opt.* **47**: 355-376.
- von Neumann J. & O. Morgenstern.** 1953. *Theory of Games and Economic Behavior*. Third edition. Princeton University Press.
- Vrijen R., E. Yablonovitch, K. Wang, H. Jiang, A. Balandin, V. Roychowdhury, T. Mor & D. DiVincenzo.** 2000. Electron-Spin-Resonance Transistors for Quantum Computing in Silicon-Germanium Heterostructures. *Phys. Rev. A* **62**: 012306-12315.
- Walther P., K. J. Resch, T. Rudolph, E. Schenck, H. Weinfurter, V. Vedral, M. Aspelmeyer & A. Zeilinger.** 2006. Experimental One-Way Quantum Computing. *Nature*, **434**: 169-176.
- Weih's G., T. Jennewein, C. Simon, H. Weinfurter & A. Zeilinger.** 1998. Violation of Bell's Inequality under Strict Einstein Locality Conditions. *Phys. Rev. Lett.* **81**: 5039- 5043.
- Weiss U.** 2008. *Quantum Dissipative Systems*. 3rd ed. (Singapore: World Scientific).
- Werner R.** 1989. Quantum States with Einstein-Podolsky-Rosen Correlations Admitting a Hidden-Variable Model. *Phys. Rev. A* **40**: 4277-4281.
- Wilczek F. & A. Zee.** 1984. Appearance of Gauge Structure in Simple Dynamical Systems. *Phys. Rev. Lett.* **52**: 2111-2114.
- Wootters W. K. & W. Zurek.** 1982. A Single Quantum Cannot be Cloned. *Nature* **299**: 802-803.
- Wootters W. K.** 1998. *Phys. Rev. Lett.* **80**: 2245-2248.
- Xiang-Bin W. & M. Keiji.** 2001. Nonadiabatic Conditional Geometric Phase Shift with NMR. *Phys. Rev. Lett.* **87**: 097901/1-4.
- Xiang-Bin W. K. Matsumoto, H. Fan, A. Tomita & J. Pan.** 2001. A Simple Way to Detect the State Transition Caused by the Nondiagonal Abelian Berry Phase. E-print quant-ph/0112071.
- Zanardi P. & M. Rasetti.** 1999. Holonomic Quantum Computation. *Phys. Lett. A* **264**: 94-99.
- Zbinden H., J. Gautier, N. Gisin, B. Huttner, A. Muller & W. Tittel.** 1997. Interferometry with Faraday Mirrors for Quantum Cryptography. *Electron. Lett.* **33**(7): 586-588.
- Zhang Q., A. Goebel, C. Wagenknecht, Y.-A. Chen, B. Zhao, T. Yang, A. Mair, J. Schmiedmayer & J.-W. Pan.** 2006. Experimental Quantum Teleportation of a Two-Qubit Composite System. *Nature Physics* **2**: 678-682.
- Zukowski M., R. Horodecki, M. Horodecki & P. Horodecki.** 1998. Generalized Quantum Measurements and Local Realism. *Phys. Rev. A* **58**: 1694-1698.
- Zurek W.** 1991. Decoherence and the Transition from Quantum to Classical. *Physics Today* **44**: 36-44.
- Zurek W.** 2002. Decoherence and the Transition from Quantum to Classical-Revisited. *Los Alamos Science* **27**: 1-24.
- Zurek W.** 2003. Decoherence, Einselection, and the Quantum Origins of the Classical. *Reviews of Modern Physics* **75**: 715-765. E-print quant-ph/0105127.

Recibido: abril 11 de 2009.

Aceptado para su publicación: mayo 30 de 2009.

EFECTO DE LOS TRATAMIENTOS QUÍMICOS Y TÉRMICOS SOBRE LA MICROESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA TIERRA DIATOMÁCEA

Por

Angela X. Moreno E.¹, Alexander Iles Q.¹, J.E. Rodríguez -Páez¹

Resumen

Moreno E. A. X., A. Iles Q. & J.E. Rodríguez-Páez: Efecto de los tratamientos químicos y térmicos sobre la microestructura y composición química de la tierra diatomácea. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **33**(127): 243-252, 2009. ISSN 0370-3908.

La tierra diatomácea es un material constituido principalmente por esqueletos silíceos de algas acuáticas microscópicas, sedimentadas en el período terciario y cuaternario. La diatomita, otro nombre que se le da a este material, se utiliza como abrasivo, material filtrante, ingrediente inerte de explosivos o como aislante de calderas y tubos. Como material filtrante se emplea principalmente en la industria cervecera y vinícola donde, después del filtrado, se torna en un desecho del proceso. En el presente trabajo se caracterizó la tierra diatomácea, desecho proveniente de una industria cervecera, utilizando Fluorescencia de Rayos X (FRX), Difracción de Rayos X (DRX), Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR), Análisis Térmico Diferencial (ATD) y termogravimétrico (TG) y Microscopia Electrónica de Transmisión (MET). Considerando el potencial uso de este desecho industrial, por ejemplo como material cementante, se estudió el efecto de los tratamientos químicos y térmicos sobre la microestructura de la tierra diatomácea.

Palabras clave: tierra diatomácea, tratamiento químico, tratamiento térmico, caracterización, microestructura.

Abstract

Diatomacea land is a material formed mainly by siliceous skeletons of microscopic aquatic algae, sedimented in the tertiary and quaternary period. The diatomite, another name given to this material is used as an abrasive, filter material, inert ingredient of explosives or as insulating of

¹ Grupo CYTEMAC. Departamento de Física / FACENED. Universidad del Cauca. Tel 57- 8209800 – Ext, 2410 fax 57-820986. Correo electrónico: axmorenoerazo@hotmail.com, alexiles28@gmail.com, jnpaez@unicauca.edu.co

boilers and pipes. As filter material, is employed primarily in the brewing and wine industry, where after filtering it becomes a waste of the process.

In this work the diatomite land, waste from a brewing industry, was characterized using X-Ray Fluorescence (XRF), X-Ray Diffraction (XRD), Infrared Spectroscopy with Fourier transform (FTIR), Differential Thermal Analysis (DTA) and thermogravimetric analysis (TG), and Electronic Microscopy of Transmission (MET). Considering the potential use of this industrial waste, for example, as a cementing material, the chemical and thermal effect on the microstructure of diatomacea land is studied.

Key words: Diatomacea land, chemical treatment, heat treatment, characterization, microstructure.

1. Introducción

La tierra diatomácea, conocida también con el nombre de sílice diatomácea, diatomita o “kieselguhr”, es un material en polvo formado casi totalmente por esqueletos de diatomeas depositados en su mayoría en el cenozoico (Cepeda, H. 1981). Los esqueletos de estos organismos unicelulares acuáticos perdieron su parte orgánica antes de sedimentarse en el fondo del mar o en el de lagos de agua dulce. El material suele tener una textura muy fina, porosa, liviana y con un color gris o blanco. Cuando es pura se compone casi en su totalidad de dióxido de silicio, sílice, pero a menudo se encuentra mezclada con arcilla, arena, cenizas volcánicas, roca calcárea, óxido de hierro y/o con sustancias orgánicas. Cuando se encuentra comprimida en una roca sólida blanquecina se denomina diatomita o trípoli (www.ingemmet.gob.pe/biblioteca_virtual/inifm/min_no_met_bentonita_diatomita.Pdf, 2005), y dentro de su composición se puede tener un ~87% de sílice, ~6% de alúmina y como componentes minoritarios óxido de hierro, sodio, potasio y/o titanio. La diatomita es utilizada como material abrasivo, filtrante, soporte inerte de explosivos y en las industrias del caucho, papel y cartón, pegantes, pinturas, detergentes y abrasivos, cosmética, como absorbente, material refractario, aislante de calderas y tubos (www.ingemmet.gob.pe/biblioteca_virtual/inifm/min_no_met_bentonita_diatomita.Pdf, 2005). Además, las tierras diatomáceas pueden ser utilizadas como puzolana en la fabricación del cemento, en aplicaciones en la agricultura y en la elaboración de ladrillos (Taylor, H. F. 1978).

Importantes depósitos de tierra diatomácea en Colombia se encuentran en el valle del Cauca, Zarzal y Obando principalmente (Sandoval, J. 1953), y no están siendo explotados adecuadamente lo que ocasiona que la tierra natural tenga aplicaciones muy limitadas por sus características que no permiten cumplir las mínimas especificaciones industriales para su uso (Zapata, A. 1977).

Para los nuevos usos de la tierra diatomácea en cromatografía, catálisis, soporte inerte, etc., se requieren ciertas propiedades de pureza y tamaño de partícula que no presenta el producto natural impuro. Zapata en su trabajo (Zapata A., 1977), utilizó un proceso químico para purificar la tierra diatomácea, preservando principalmente su pureza química. Además, favoreció sus propiedades adsorbentes mediante activación térmica, lavado y neutralización del material, pero no indicó de manera específica cuáles eran los efectos de estos procesos sobre la microestructura de la tierra diatomácea.

En este trabajo, después de caracterizar adecuadamente la tierra diatomácea proveniente del proceso de filtrado de una empresa cervecera, utilizando para ello Fluorescencia de Rayos X (FRX), Difracción de Rayos X (DRX), Espectroscopia Infrarroja, análisis térmicos (ATD/TG) y Microscopia Electrónica de Transmisión (MET), se estudió el efecto de los tratamientos químicos y térmicos en su acondicionamiento para potenciales aplicaciones industriales. Se puso especial atención a la evolución de las fases cristalinas, y grupos funcionales, presentes en la tierra diatomácea empleada al ser sometida a tratamientos en ácido y a la acción de la temperatura.

2. Procedimiento experimental

Inicialmente se caracterizó la tierra diatomácea que se utilizó en el trabajo (M0). Para ello se le tomó el espectro infrarrojo (FTIR) con el fin de conocer los grupos funcionales presentes en la muestra; el equipo que se utilizó para este fin fue el Termo electrón corporation, NICOLET IR 200, formando pastillas con el KBr (Fischer scientific; CAS 7758-02-3). La composición química de la tierra diatomácea se determinó utilizando Fluorescencia de Rayos X (FRX), para ello se empleó el equipo PW – 2440 Philips de la Universidad Nacional sede Bogotá. Las fases cristalinas presentes en la muestra se identificaron a partir de los difractogramas de rayos X tomados con un difractor

Siemens D - 5000 que tiene una fuente de Cu ($\lambda=1.541 \text{ \AA}$) barriendo 2θ entre 10 y 70° . El tamaño y la morfología de las partículas se determinó utilizando un Microscopio Electrónico de Transmisión marca JEOL – 1200 EX.

2.1 Tratamientos químicos

La tierra diatomácea a estudiar, M0, se sometió a tratamientos químicos para eliminar componentes minoritarios presentes en ella. El material se sometió a reflujos con ácido clorhídrico (HCl, marca Aldrich) y ácido nítrico (HNO₃, marca Carlo Erba) en soluciones con concentración 0.03M, 0.1M y 0.5 M. Para ello se tomaron 400 gr de M0 y se mezclaron con 2500 ml del volumen de la solución, en un balón aforado. Posteriormente, la suspensión se calentó llevándola a ebullición durante cuatro (4) horas. Después de dejar decantar y enfriar la mezcla, se realizó un lavado con agua destilada para eliminar el ácido presente en la muestra. El sólido húmedo se secó a una temperatura de 50°C , durante veinticuatro (24) horas; como resultado de este procedimiento se obtuvieron las muestras en polvo que se referencian en la tabla 1.

Para conocer los principales grupos funcionales presentes en las muestras tratadas químicamente se utilizó espectroscopia infrarroja (FTIR). Con el fin de determinar la eficiencia del ataque con uno u otro ácido, en la eliminación de los compuestos minoritarios de la tierra diatomácea, se empleó la técnica de FRX. Para ello se analizaron tierras diatomáceas tratadas con HCl y HNO₃ a 0.5 molar, M5Cl-25 y M6N-25 respectivamente. Otras técnicas que se utilizaron para determinar el efecto del tratamiento químico, sobre la muestra M0, fueron: análisis térmico de las muestras M5Cl-25 y M6N-25; DRX de las muestras M1Cl-25, M2N-25, M5Cl-25 y M6N-25, y MET de los sólidos M5Cl-25 y M6N-25.

2.2 Tratamientos térmicos

Para determinar el efecto de la temperatura sobre la composición y micro-estructura de la tierra diatomácea,

tanto sin como tratadas químicamente, ella fue sometida a tratamientos térmicos a temperaturas de 450 , 650 , 850 y 1000°C , durante una hora. Para ello se utilizó un horno de marca Maxthermo ref. MC-2838P, elevando gradualmente la temperatura a razón de 5°C por minuto, hasta alcanzar la temperatura deseada; la muestra se tuvo a esta temperatura durante una hora y luego se enfrió a la velocidad de enfriamiento del horno hasta alcanzar la temperatura ambiente. Las muestras tratadas térmicamente se caracterizaron con espectroscopia infrarroja, con el fin de conocer la evolución de los grupos funcionales presentes en estas, MET para determinar la morfología y el tamaño de las partículas que conformaban la tierra diatomácea, poniéndole especial atención a la muestra M6N-25, tratada químicamente con HNO₃ 0.5 molar, térmicamente a 1250°C .

3. Resultados y discusión

3.1 Caracterización de las Tierras Diatomáceas (TD)

La diatomita dentro de sus múltiples usos es usada como medio filtrante en las industrias cervecera, de vinos y jugos (www.Igme.es/Internet/recursosminerales/panoramaminero/minerales/diatomita03.htm.2005). El material utilizado en el presente trabajo fue el desecho industrial de una fábrica de cerveza, muestra que se denominó M0 tal como se indica en la tabla 1. Al observar una muestra de este material con microscopia electrónica de transmisión, se ven partículas con una morfología circular, con porosidad dispuesta en forma radial y con un tamaño del orden de las micras, tal como se muestra en la figura 1.

Para determinar la composición de estas tierras se utilizó Fluorescencia de Rayos X (FRX); los datos obtenidos de este análisis se indican en la tabla 2 y se comparan con datos típicos de algunas tierras diatomáceas comerciales.

La tabla 2 indica que la tierra diatomácea utilizada en este trabajo (M0) contiene principalmente silicio, en muy

Tabla 1. Referencia de las muestras de tierra diatomácea, sin y con tratamiento químico, estudiadas en este trabajo.

Referencia	Condiciones
M0	Tierra diatomácea tomada del proceso de filtrado en la fábrica cervecera
M1Cl-25	M0 tratada químicamente con HCl a 0.03M
M2N-25	M0 tratada químicamente con HNO ₃ a 0.03M
M3Cl-25	M0 tratada químicamente con HCl a 0.1M
M4N-25	M0 tratada químicamente con HNO ₃ a 0.1M
M5Cl-25	M0 tratada químicamente con HCl a 0.5M
M6N-25	M0 tratada químicamente con HNO ₃ a 0.5M

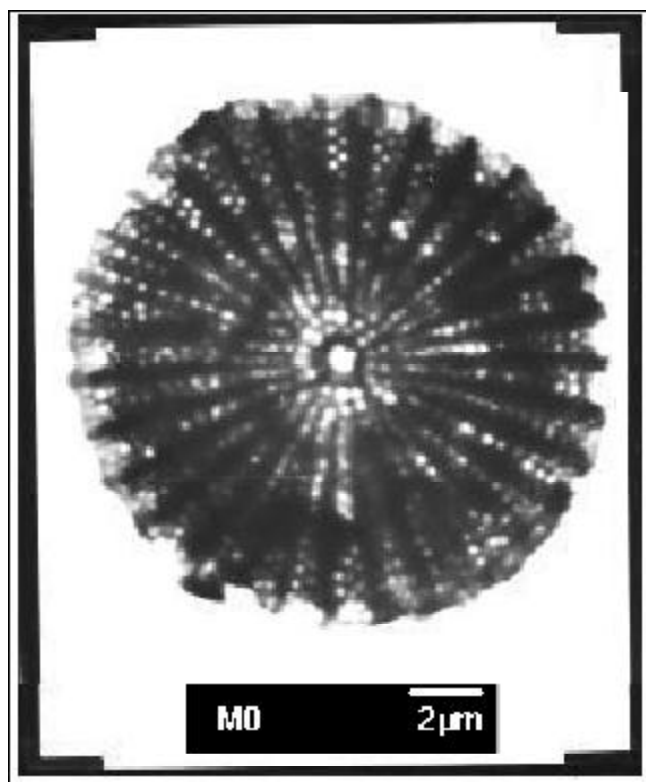


Figura 1. Fotografía obtenida con MET de una de las partículas de la muestra M0

alta proporción, aluminio, y hierro. Otros cationes presentes, en menor proporción, son el calcio, magnesio, titanio, potasio, sodio y fósforo. El contenido de aluminio de M0 es menor al que presenta la muestra del Valle del Cauca, pero su contenido en sílice es mayor.

El alto contenido de silicio de M0 la hace potencialmente útil como fuente de sílice para la obtención, por ejemplo, de silicatos de calcio. Ya que la muestra M0 no fue sometida a ningún tratamiento químico ni térmico, después de ser utilizada como filtro en la industria cervecera, ella debería contener impurezas orgánicas que no fueron muy evidentes en los valores de las pérdidas por ignición indicados en la tabla 2.

Con el fin de conocer las fases cristalinas presentes en este material se utilizó Difracción de Rayos X (DRX). Para ello se analizaron las muestras sin y con tratamiento térmico a 1050 °C (figura 2). En los difractogramas son evidentes los tres picos característicos del dióxido de silicio (PDF 76-0939), siendo esta la fase cristalina más importante en las tierras diatomáceas (TD); también se observa que el tratamiento térmico no afecta la estructura cristalina.

Para determinar los grupos funcionales presentes en M0 se utilizó espectroscopia infrarroja (FTIR). El espectro obtenido, figura 3, presenta dos regiones importantes: una por encima de los 1000 cm^{-1} donde se encuentran princi-

Tabla 2. Composición química determinada con FRX de la tierra diatomácea utilizada en este trabajo (M0) y su comparación con la composición de otras tierras diatomáceas.

COMPUESTO	M0 (%)	Valle del Cauca [*] (Suramérica) (%)	Nevada (España) [*] (%)	Argelia (África) [*] (%)
SiO ₂	81,348	72,14	86,57	71,99
Al ₂ O ₃	5,012	10,06	5,50	3,00
Fe ₂ O ₃	2,181	6,04	1,56	1,12
CaO	0,491	0,36	0,20	8,15
MgO	0,438	0,84	0,17	2,30
TiO ₂	0,303	---	---	0,13
K ₂ O	0,303	---	0,71	0,63
Na ₂ O	0,220	---	---	---
P ₂ O ₅	0,088	---	---	---
MnO	0,014	---	---	---
Pérdidas ignición	9,602	9,90	5,87	12,88

* Zapata, A. 1977.

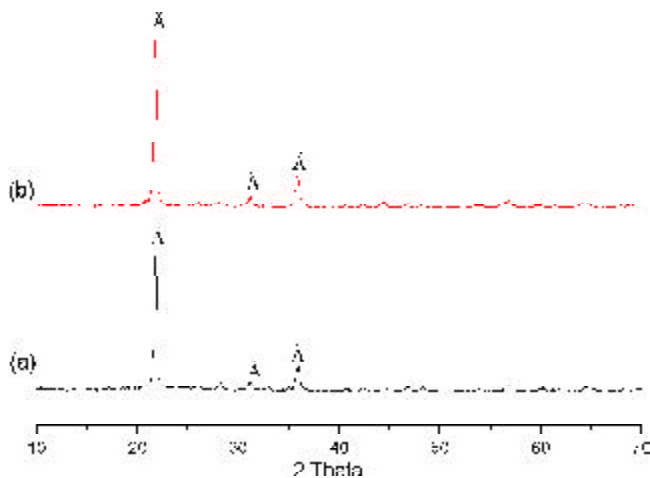


Figura 2. Difractograma de Rayos X de: (a) Tierra diatomea (M0) sin tratamiento térmico y (b) Tierra diatomea (M0) tratada térmicamente a 1050 °C, durante 1 hora. [(\AA) SiO₂].

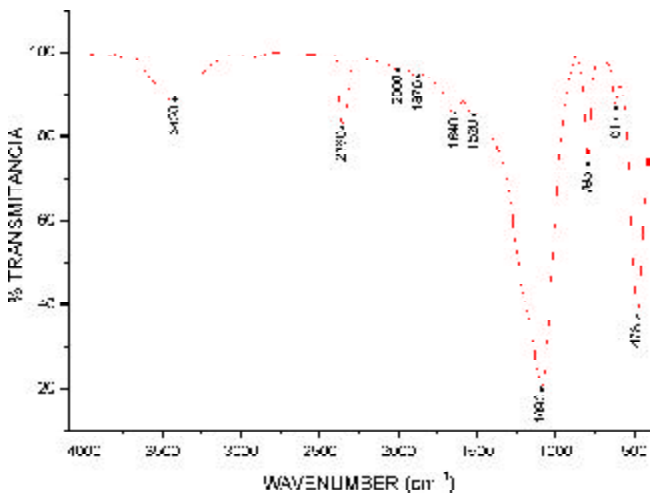


Figura 3. Espectro infrarrojo correspondiente a la muestra M0 (tierra diatomea sin tratamiento químico ni térmico).

palmente las bandas correspondientes a grupos funcionales orgánicos y otra por debajo de los 1000 cm⁻¹ donde se ubican las bandas asociadas a los grupos inorgánicos, principalmente los modos vibracionales correspondientes a los enlaces M-O y M-OH, (James, J. *et al.*, 1986).

En la parte inorgánica se destacan las tres bandas asociadas al SiO₂, siendo la más importante la ubicada a 1100 cm⁻¹ y que indica la existencia de tetraedros de siloxanos cíclicos; la presencia de los tetraedros de silicio es confirmada por la banda ubicada a 795 cm⁻¹ (James, J. *et al.*, 1986; Sócrates, G. 1994).

En la figura 4 se muestran los espectros de la muestra M0 tratada térmicamente a 450°C (M0-450), 650°C (M0-650), 850°C (M0-850) y 1000°C (M0-1000), durante una hora. Los espectros son muy similares salvo que las bandas asociadas al agua, ~ 3500 cm⁻¹ y 1640 cm⁻¹ (Sócrates, G. 1994), se modifican ligeramente pero las bandas características del dióxido de silicio se mantienen durante el tratamiento térmico.

En la tabla 3 se indican las bandas mas importantes que aparecen en los espectros infrarrojos de las muestras analizadas, figuras 3 y 4, y a qué grupos funcionales se pueden asociar considerando los datos de la literatura (Sócrates, G. 1994). Observando los espectros de las figuras 3 y 4, y los datos de la tabla 3, se verifica que las tierras diatomeas utilizadas en este proyecto son ricas en silicio (Sócrates, G. 1994).

El ensayo de termogravimetría de la tierra diatomea (M0) se realizó en el rango de temperatura entre temperatura ambiente y 1000°C, obteniéndose la curva que se

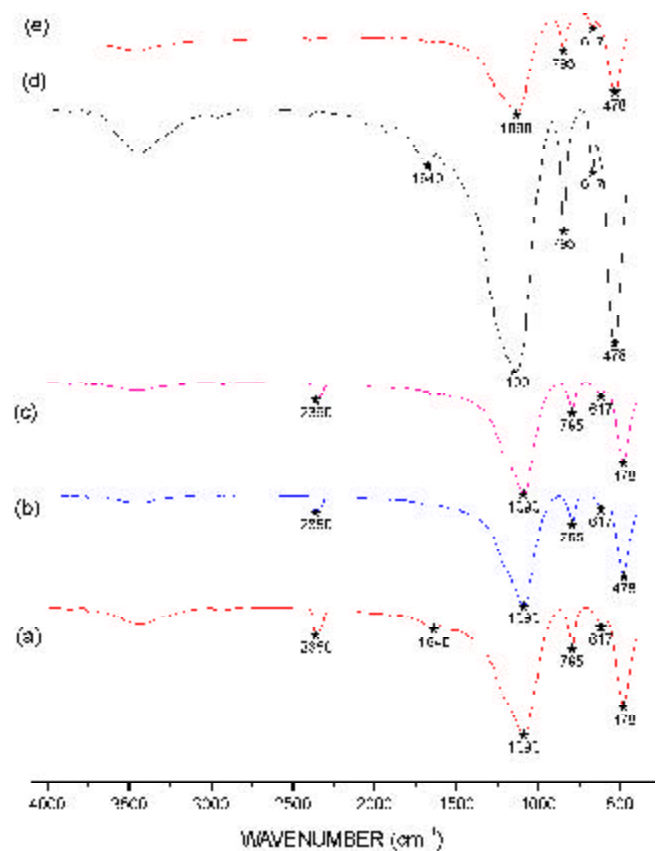


Figura 4. Espectros de infrarrojo de la muestra M0 tratada térmicamente a: (a) 60°C, (b) 450°C, (c) 650°C, (d) 850°C y 1000°C, durante una (1) hora.

Tabla 3. Asignación de grupos funcionales a las bandas más importantes que presentan los espectros de las figuras 3 y 4.

Bandas cm^{-1}	Grupos Funcionales
478	δ (Si – O – Si) Deformación en el plano
617	Confirmación < 650
671	δ (COO) Deformación en el plano
795	Si – C st P – C st
1090	Si – O – Si *
1100	Tetraedros siloxanos cíclicos (γ_s -Si-O)
2360	CO ₂ ambiente
3420	O – H (Intermoleculares)
3750	Si – OH silanoles

muestra en la figura 5; se observa que la muestra M0 sufre una pérdida de peso de $\sim 10\%$, durante el tratamiento térmico.

Para complementar la caracterización de la muestra M0, y conocer más detalles sobre su comportamiento térmico, se le efectuó el ensayo de Análisis Térmico Diferencial (ATD), figura 5, en la cual son evidentes dos picos exotérmicos a ~ 312 y 423°C que corresponden a la eliminación de compuestos orgánicos que existían en el sistema, como lo reiteran los resultados de espectroscopia infrarroja, y la cristalización de compuestos que inicialmente tendrían una estructura amorfa, en los cuales estarían presentes enlaces del tipo Si – O – Si ó Si – O – Al, principalmente (Mackenzie, R, C. 1970).

A temperaturas mayores se observan algunos pequeños picos exotérmicos que pueden corresponder a transformaciones de fase en el sistema así, por ejemplo, el pico a 1015°C puede corresponder a la formación de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ en la muestra (Cobo, J. 2005). Por otro lado, a partir de 1434°C se observa en la curva de ATD, figura 5, un evento térmico muy importante, muy probablemente de naturaleza endotérmica y que debido al rango de temperatura de trabajo del equipo no fue posible visualizarlo totalmente (Mackenzie, R, C. 1970).

3.2 Efecto de los tratamientos químicos y térmicos sobre la tierra diatomea

En búsqueda de una forma efectiva de eliminar compuestos no deseados presentes en M0, siendo de interés central la presencia de SiO_2 y Al_2O_3 , se realizaron ataques químicos con HCl y HNO_3 a diferentes concentraciones.

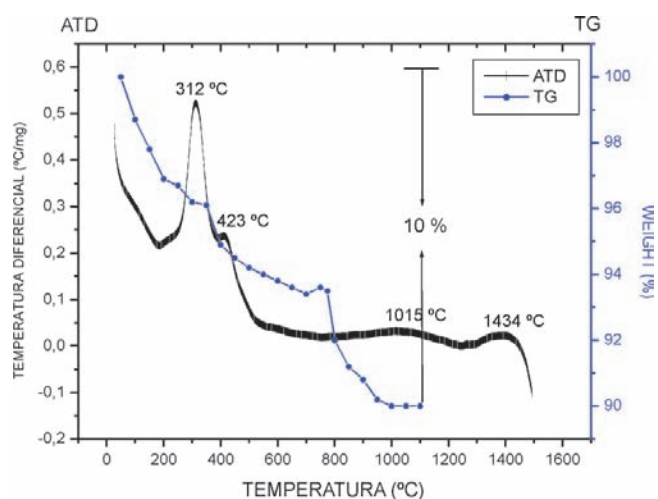


Figura 5. Curvas de análisis térmico (ATD/TG) correspondiente a la muestra M0.

Para determinar el efecto de estos tratamientos químicos sobre las muestras, se realizó un estudio de la evolución de los grupos funcionales y las fases cristalinas presentes en las mismas.

En la figura 6 se indican los espectros correspondientes a muestras tratadas con una solución 0.03M de HCl y que luego fueron sometidas a tratamientos térmicos a diferentes temperaturas.

Observando los espectros de la figura 6 se puede concluir que los tratamientos químicos con HCl 0.03 M y térmicos, a que fue sometida la tierra diatomea (M0), no produjeron grandes cambios en los grupos funcionales presentes en la muestra.

Igual a lo que sucedió con las muestras a las que corresponden los espectros de la figura 6, la muestra M0 tratada con una solución 0.1 M de HCl y sometida luego a diferentes temperaturas (de la cual no se muestran los espectros), no presentó cambios apreciables.

En los espectros de la figura 7 se ilustra el efecto del tratamiento químico de la muestra M0 con una mayor concentración de HCl, 0.5 M, y sometida a diferentes tratamientos térmicos; en ellos no se observan grandes cambios con respecto a los espectros de la figura 6, salvo la aparición de una banda a 671 cm^{-1} .

En la figura 8 se indica el efecto del tratamiento de M0 con HNO_3 y al ser sometida a diferentes tratamientos térmicos. En estos espectros no se observan grandes modificaciones de los grupos funcionales, salvo la aparición de bandas a 625 y 671 cm^{-1} durante el tratamiento térmico. Lo

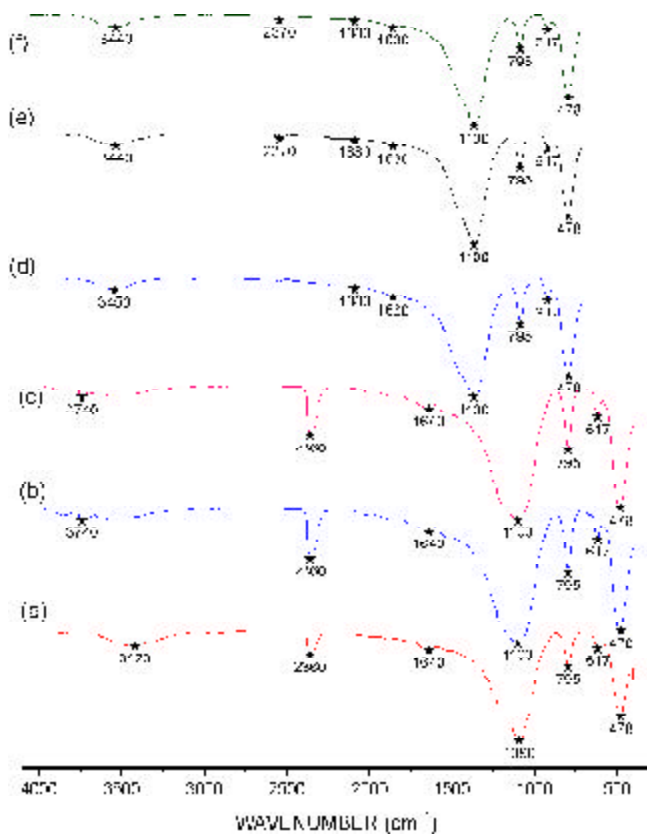


Figura 6. Espectros Infrarrojos correspondientes a: (a) tierra diatomea (M0), (b) M0 tratada químicamente con una solución 0.03 M de HCl (M1C1-25) y luego tratada térmicamente a (c) 450°C (M1C1-450), (d) 650°C (M1C1-650), (e) 850°C (M1C1-850) y (f) 1000°C (M1C1-1000), durante una hora.

mismo ocurrió con muestras M0 tratadas con soluciones que contenían 0.03 y 0.1 molar de HNO₃, cuyas figuras no se muestran.

Como se pudo observar en los espectros anteriores, figuras 6, 7 y 8, los ataques químicos y térmicos no modifican los grupos funcionales más importantes presentes en las muestras, tabla 3, conservándose las bandas asociadas al SiO₂ (~ 1090, 795 y 478 cm⁻¹ (Sócrates, G. 1994; Taylor, H. F. 1978)), lo que indica que la tierra diatomea empleada es muy estable ante tratamientos químicos y térmicos, hasta ~1430°C donde ocurre el proceso endotérmico importante (figura 5).

Para determinar el cambio composicional de la muestra M0, al ser tratada químicamente, se utilizó Fluorescencia de Rayos X. En la tabla 4 se muestran los resultados composicionales obtenidos para muestras tratadas con ácido HCl (0.5 molar “M5C1-25”) y HNO₃ (0.5 molar “M6N-25”), y se comparan con los datos de la muestra M0.

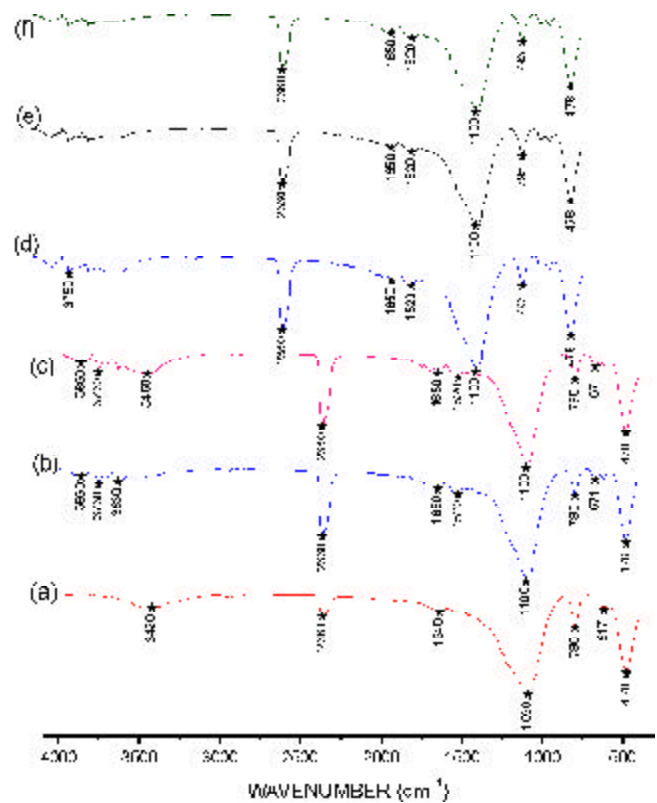


Figura 7. Espectros de infrarrojo correspondiente a las muestras: (a) tierra diatomea (M0), (b) M0 tratada químicamente con una solución 0.5 M de HCl (M5C1-25) y luego tratada térmicamente a (c) 450°C (M5C1-450), (d) 650°C (M5C1-650), (e) 850°C (M5C1-850), y (f) 1000°C (M5C1-1000), durante una hora.

Se observa en la tabla 4 que los elementos que constituyen, en mayor proporción, las tierras diatomeas (TD), sin y con tratamiento químico, son: silicio, aluminio y hierro. Comparando los datos de la tabla 4 se puede observar que la muestra tratada con HCl (M5C1-25) presenta un mayor porcentaje de SiO₂ y Al₂O₃ que cuando se utiliza HNO₃ (M6N-25) en el ataque químico. En general, realizando los tratamientos químicos indicados, en las tierras diatomeas se observa una disminución en el porcentaje de los compuestos minoritarios (tabla 4), notándose que tiene un mayor efecto el tratamiento con ácido clorhídrico (muestra M5C1-25) que con ácido nítrico (muestra M6N-25). A pesar de esto, el uso de HCl durante el tratamiento químico (reflujo) puede enriquecer el sistema con iones cloruro los cuales afectan la reactividad del producto al ser mezclado con otros compuestos (Greenwood, N. et al., 1995). Por lo tanto, aunque el utilizar HNO₃ no favorece el incremento aparente de la cantidad de silicio en la muestra, tabla 4, su empleo reduce la posibilidad de contaminación de la muestra ya que los nitratos se pueden extraer más fácilmente,

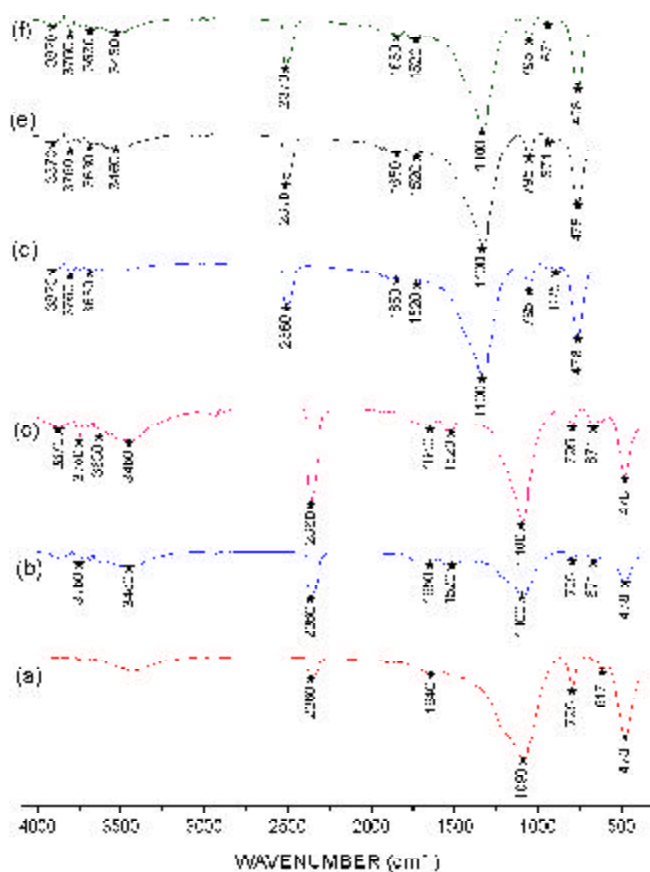


Figura 8. Espectros de infrarrojo correspondiente a: (a) tierra diatomea (M0), (b) M0 tratada químicamente con una solución de 0.5 M de HNO_3 (M6N-25) y luego tratada térmicamente a (c) 450°C (M6N-450), (d) 650°C (M6N-650), (e) 850°C (M6N-850) y (f) 1000°C (M6N-1000), durante una hora.

Tabla 4. Resultados de FRX de la tierra diatomea tal como se recibió, M0, y de muestras tratadas químicamente con HCl , 0.5 M y HNO_3 , 0.5 M.

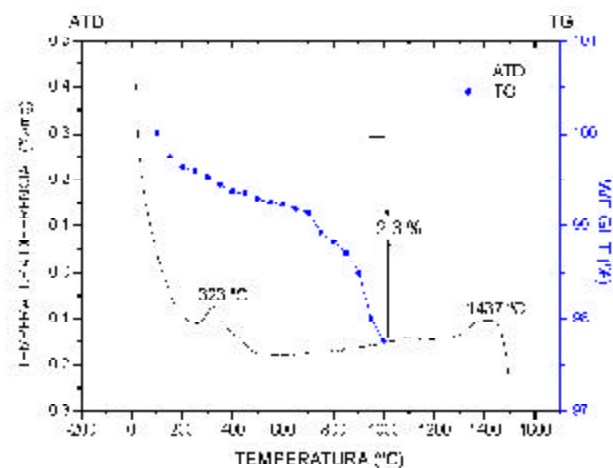
Compuesto	M0 (%)	M5Cl - 25 (%)	M6N-25 (%)
SiO_2	81,348	87,017	83,535
Al_2O_3	5,012	5,748	5,588
Fe_2O_3	2,181	2,619	2,655
CaO	0,491	0,452	0,447
MgO	0,438	0,532	0,508
TiO_2	0,303	0,373	0,357
K_2O	0,303	0,275	0,269
Na_2O	0,220	0,330	0,318
P_2O_5	0,088	0,026	0,021
MnO	0,014	0,008	0,005

calentando la muestra a relativas bajas temperaturas (Mackenzie, R. C. 1970).

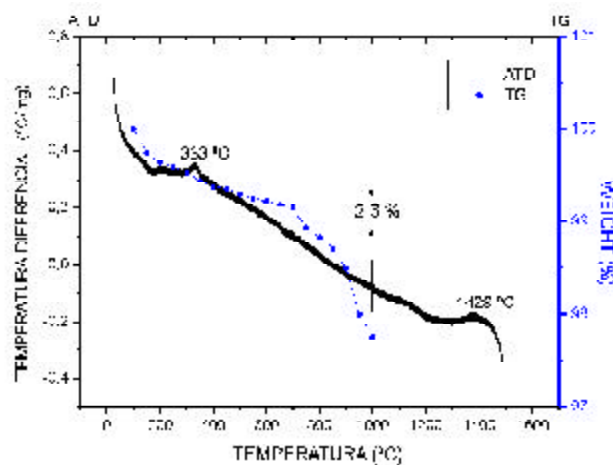
Estos resultados reiteran el potencial uso de las tierras diatomeas como fuente de sílice en la obtención de silicatos de calcio, por ejemplo.

En la figura 9 se muestran los resultados de los análisis térmicos realizados a muestras tratadas químicamente con HCl y HNO_3 , 0.5M, en un rango de temperatura entre temperatura ambiente y 1000°C

Comparando las figuras 5 y 9 se observa que las muestras tratadas químicamente, M5Cl-25 y M6N-25, pierden 2.3% de su peso inicial en comparación con el 10% que pierde la muestra M0 al calcinarla, lo que reitera que el



(a)



(b)

Figura 9. Curvas de análisis térmicos (ATD/TG) correspondientes a muestras atacadas químicamente con: (a) HCl 0.5 M (M5Cl -25) y (b) HNO_3 0.5M (M6N-25).

tratamiento químico ayuda a eliminar componentes minoritarios, tal como lo indican los resultados del análisis de Fluorescencia de Rayos X (tabla 3), y por eso se reduce la pérdida de peso en las muestras tratadas.

Por otro lado, en las curvas de análisis térmico diferencial (ATD) de las muestras M5Cl-25 y M6N-25 (figura 9), se observa un pequeño pico exotérmico a $\sim 330^\circ\text{C}$, diferente a lo que se observa en la figura 5 y que debe corresponder a la descomposición de compuestos orgánicos presentes en las muestras. Existe, además, por encima de los $\sim 1430^\circ\text{C}$ indicio de un pico endotérmico que se puede asociar a alguna transformación de fase muy importante (Mackenzie, R. C. 1970), que no se pudo desarrollar completamente debido al rango de trabajo del equipo utilizando para tomar la curva ATD, igual a lo que sucedió con la muestra M0 (Figura 5).

Para conocer las fases cristalinas presentes en las muestras tratadas químicamente se utilizó Difracción de Rayos X. En los difractogramas, figura 10, se encuentran los tres picos característicos del dióxido de silicio (PDF 76-0939) (Tablas patrón de la JCPDF), ratificando que el ataque químico no modifica las fases cristalinas presentes en las muestras (ver figura 2).

Para conocer que ocurrió con el tamaño y la morfología de las partículas que conformaban la tierra diatomea, después de tratar química y térmicamente la muestra, se utilizó Microscopía Electrónica de Transmisión (MET) cuyas fotografías se muestran en la figura 11. Se observa en las figuras 11(a) y 11(b) que las partículas de la tierra diatomea tratada químicamente, con una solución 0.5M de HCl (M5Cl-25) y 0.5M de HNO_3 (M6N-25) respectivamente, presentan una morfología circular con porosidad más definida que en la muestra M0 (figura 1).

La figura 11(c) permite apreciar la pérdida de la forma de las partículas de tierra diatomea ocasionada por el tratamiento térmico a alta temperatura. La estructura de la partícula se ha deformado de tal manera que da la impresión de un proceso de “fundición” de la sílice.

4. Conclusiones

Considerando los resultados obtenidos en el presente trabajo se puede concluir lo siguiente:

1. Se caracterizó la tierra diatomea utilizada en el proceso de filtración por una empresa de cerveza. Los resultados indican, reiterando lo conocido, que esta materia prima contiene alta cantidad de silicio, aluminio, hierro y en menor proporción calcio, magnesio,

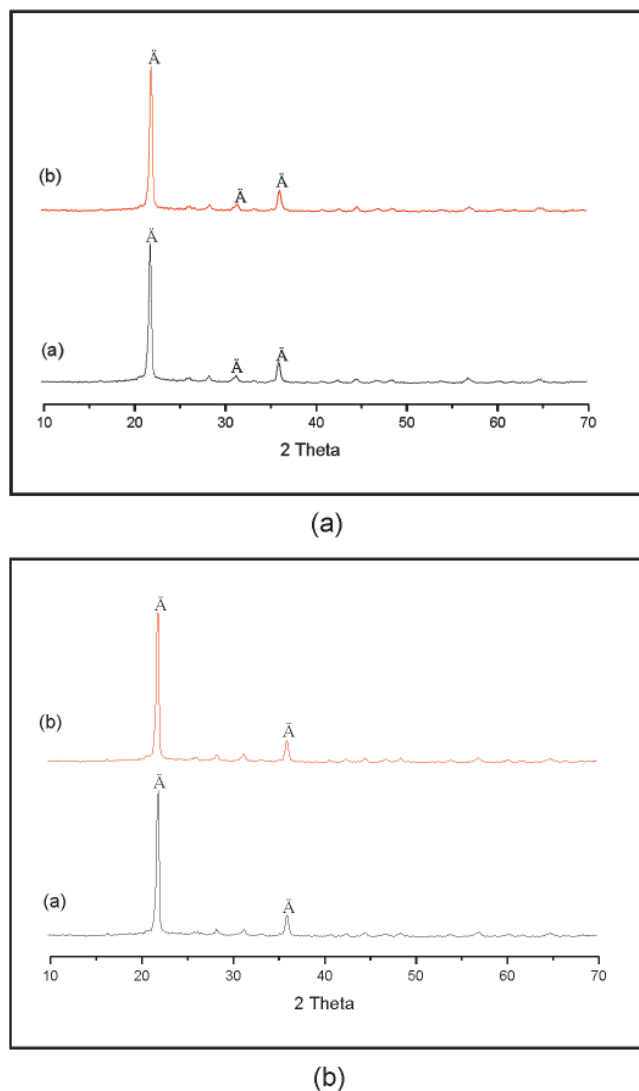


Figura 10. Difractogramas de Rayos X de la tierra diatomea tratada químicamente con soluciones de: (a) HCl 0.03 M (M1Cl-25) y HNO_3 0.03 M (M2N-25) y (b) HCl 0.5 M (M5Cl-25) y HNO_3 0.5 M (M6N-25); [\otimes] SiO_2 .

titanio y potasio, siendo la sílice la principal fase cristalina presente en la tierra diatomea. Esto la constituye en un precursor adecuado de Si_2O para utilizarla en la obtención de compuestos con mayor valor agregado, entre ellos silicatos de calcio con propiedad cementante, lo que se adiciona a los usos convencionales que presenta la tierra diatomea.

2. Los tratamientos químicos con HCl y HNO_3 0.5 M, durante 4 horas, y térmico a diferentes temperaturas, durante una hora, no afectaron apreciablemente los grupos funcionales y las fases cristalinas presentes

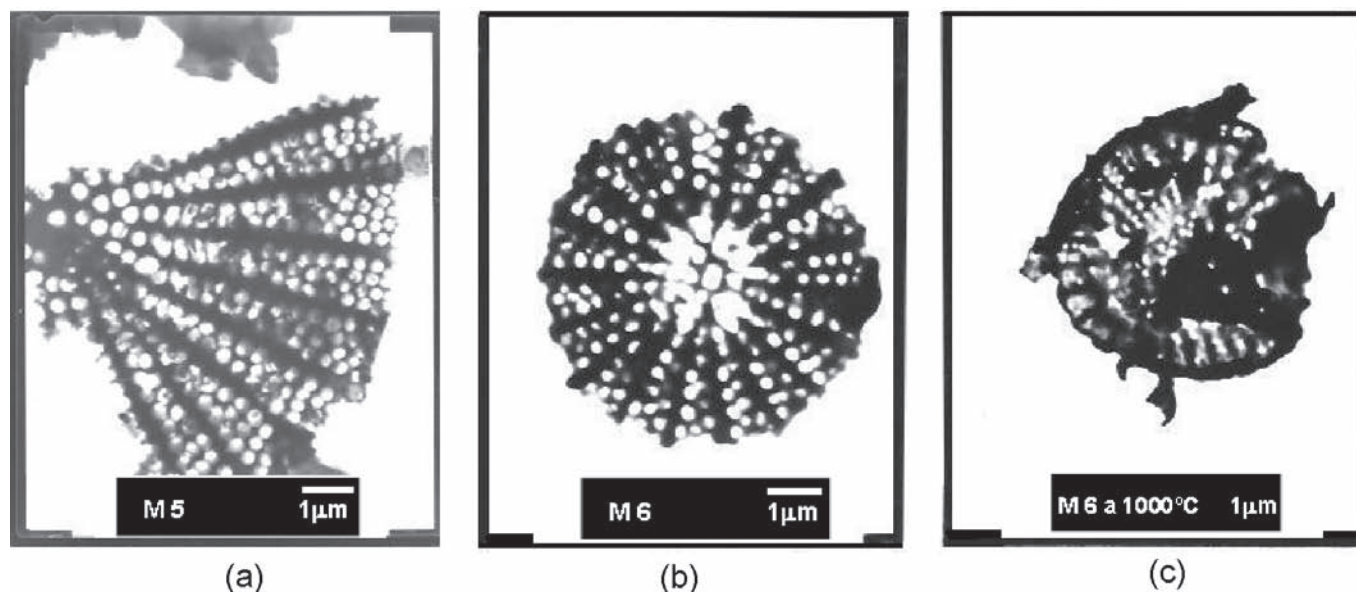


Figura 11. Fotografías obtenidas con MET de muestras tratadas químicamente con: (a) una solución de HCl 0.5 molar (M5Cl-25), (b) una solución de HNO_3 0.5 molar, (M6N-25) y (c) la muestra M5N-25 tratada térmicamente a 1000°C (M5N-1000), durante una hora.

en las tierras diatomáceas. Se observa una pequeña eliminación de los compuestos minoritarios tal como lo indican los resultados de fluorescencia de rayos X; el tratamiento químico más adecuado para reducir el contenido de los compuestos minoritarios, sin impurificar el producto obtenido, fue el realizado utilizando HNO_3 0.5M. Estos resultados reiteran la gran estabilidad química y térmica, hasta los 1430°C , de la tierra diatomácea estudiada.

5. Bibliografía

- Cepeda, Héctor.** 1981. Recursos minerales de Colombia. Ingeominas, Bogotá, Segunda edición, pp. 772-774.
- Cobo, Janeth.** 2005. Estudio de la síntesis de alúmina por el método de precipitación controlada (mpc). Popayán. Trabajo de grado. (Química). Universidad del Cauca. Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación, pp. 125-141.
- Greenwood, N & Earnshaw, A.** 1995. Chemistry of the elements. Butterworth – Heineman Ltd. pp. 920-1041.
- James, J, & Subba, R.** 1986. Characterization of Silica in Rice Husk Ash. En: Am. Ceram. Soc Bull. **65**(8): 1177-80.
- Mackenzie, R. C.** 1970. Differential Thermal, Academic Press, pp. 418-419, 477-551.
- Sandoval, José.** 1953. Yacimientos de diatomita en el Valle del Cauca. Ministerio de minas y petróleos. Servicio geológico nacional. Informe 930. Bogotá, pp. 5-6.
- Socrates, G.** 1994. Infrared Characteristic Group Frecuencias. John Wiley & Sons, pp. 126-127, 138-144.
- Tablas patrón de la JCPDF.** Program, DRX Win.
- Taylor, H. F.** 1978. La química de los cementos., Urmo de ediciones, Vol. I. España, pp. 39, 85, 134.
- www.ingemmet.gob.pe/biblioteca_virtual/inifm/min_no_met_bentonita_diatomita.** Pdf. 2005.
- www.Igme.es/Internet/recursosminerales/panoramaminero/minerales/diatomita03.htm.** 2005.
- Zapata Ceballos, Ángel.** 1977. Estudio químico de la tierra diatomácea del Valle del Cauca. Decanatura de investigaciones. Universidad del Valle. Monografía de investigación N° 8, pp. 1-12.

Recibido: abril 4 de 2008.

Aceptado para su publicación: abril 13 de 2009.

ESTUDIO TEÓRICO DE LA INTERACCIÓN ENTRE LA GLUTATIÓN ZETA TRANSFERASA (GSTZ) Y ÁCIDOS α -HALOALCANOICOS

Por

Ricardo Vivas-Reyes*, Angélica Padilla*, Emiliano Martínez*

Resumen

Vivas-Reyes, R., A. Padilla & E. Martínez: Estudio teórico de la interacción entre la glutatión zeta transferasa (GSTZ) y ácidos α -haloalcanoicos. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **33**(127): 253-272, 2009. ISSN 0370-3908.

La estructura 3D de la glutatión Z-transferasa se obtuvo del Protein Data Bank bajo el código 1FW1; posee una secuencia de 208 residuos (5 al 212). El modelo obtenido consta de 208 aminoácidos, un ión sulfato, una molécula de glutatión, una molécula de 2,3-dihidroxi-1,4-ditiobuano (DTT) y 109 moléculas de agua. Siendo el residuo Ser10 el responsable de la actividad catalítica.

A pesar de las diferencias numéricas en los valores de las funciones de evaluación y teniendo en cuenta el error asociado a la utilización de métodos derivados de la mecánica clásica los resultados del docking molecular fueron lo suficientemente adecuados para estimar la posible localización y conformación de los aductos formados entre glutatión y ácidos α -haloalcanoicos; estos resultados mostraron una apropiada complementariedad geométrica entre el sitio activo y los α -haloalcanoicos; no evidenciaron diferencias significativas con respecto a la estereo selectividad y estereo especificidad de la GSTZ hacia los ácidos α -haloalcanoicos. Adicionalmente los resultados sugieren que los ligandos estudiados tienen la suficiente movilidad dentro del sitio activo para generar poses con alta afinidad de unión pero con poca probabilidad de ocurrencia, lo cual puede deberse a la orientación que asumen algunos átomos de hidrógeno.

Palabras clave: xenobióticos, ácidos α -haloalcanoicos, enzimas glutatión transferasas (GSTs), glutatión S-transferasa de clase zeta (GSTZ), α -halo ácidos, DCA, MAAi.

Abstract

The 3D structure of the Z-glutathione transferase was obtained from the Protein Data Bank (PDF) under the code 1FW1, this protein has a sequence of 208 residue (5 to 212). The model

* Grupo de Química Cuántica y Teórica, Universidad de Cartagena. Facultad de Ciencias Naturales y Exactas. Campus de Zaragocilla. Cartagena-Colombia.

obtained consists of 208 amino acids, 1 sulfate ion, a molecule of glutathione, a molecule of 2,3-dihydroxy-1, 4-ditiobuano (DTT) and 109 water molecules. Being the residue Ser10; responsible for the catalytic activity.

Despite some differences in numerical values of the functions of evaluation and taking into account the error associated with the use of methods derived from classical mechanics the results of molecular docking were quite adequate to estimate the possible location and conformation of adducts formed between glutathione and acid- α -Haloalkane, these results showed a good agreement between geometric found to α -Haloalkane and the active site, this compounds did not show significant differences regarding stereoselectivity and stereospecificity of GSTZ towards acids α -Haloalkane. Additionally, the results suggest that the ligands studied have enough mobility within the active site to generate poses with high affinity binding but with little probability of occurrence, which may be due to the orientation they assume some hydrogen atoms.

Key words: xenobiotics, α -Haloalkane acids, enzymes glutathione transferases (GSTs), glutathione S-transferase class zeta (GSTZ), α -halo acids, DCA, MAAi.

Introducción

Los organismos vivos se exponen continuamente a un gran número de especies químicas externas no-alimenticias. Estos agentes xenobióticos pueden deteriorar el funcionamiento del organismo causando efectos tóxicos y a veces carcinógenos. La amenaza por tales compuestos ha aumentado sustancialmente durante los dos últimos siglos debido a la gama de nuevos productos químicos artificiales introducidos en el ambiente, tales como los ácidos α -haloalcanoicos; sin embargo, en la naturaleza se encuentran compuestos químicos tóxicos provenientes de plantas y hongos como los fenoles, aflatoxinas y especies reactivas de oxígeno como el radical superóxido y el peróxido de hidrógeno. La capacidad de sobrevivir a la amenaza presentada por compuestos endógenos y/o compuestos xenobióticos representa probablemente una adaptación biológica fundamental para la supervivencia¹. Dentro de la amplia gama de compuestos que los organismos vivos emplean para degradar compuestos dañinos se encuentran las enzimas glutatión transferasas (GSTs). Estas son encontradas ubicuamente en organismos aeróbicos y catalizan la conjugación de glutatión a una amplia variedad de sustratos electrofílicos². Los miembros de la super familia GST también presentan actividad glutatión peroxidasa y contribuyen al metabolismo de hidroperóxidos orgánicos generados en las células^{3,4}. Las GSTs son conocidas por metabolizar un gran número de derivados carcinógenos medioambientales y una deficiencia inherente de esta ha sido asociada con un incremento de los riesgos de padecer cáncer⁵. En contraste, la sobre expresión de GSTs en células tumorales puede contribuir con la resistencia a drogas².

La glutatión S-transferasa de clase zeta (GSTZ) es una clase de GST recientemente descubierta y ha demostrado

ser de mucho interés debido a su contribución al catabolismo de fenilalanina y tiroxina y su papel en el metabolismo de α -halo ácidos. La GSTZ fue descubierta originalmente como resultado de un acercamiento de la bioinformática y la genómica, a mediados de 1990⁶. Esta y otras aproximaciones también han llevado al descubrimiento de varias formas polimórficas de GSTZ. La GSTZ es una enzima involucrada en la detoxificación de compuestos tales como dicloroacetato (DCA), que es de gran interés toxicológico y de salud pública. El DCA es un tóxico de multisitios y carcinógeno que aparece como un subproducto de la desinfección con cloro de agua y del contaminante medioambiental tricloroetileno. La GSTZ conocida también conocida como maleilacetoacetato isomerasa (MAAi) es una proteína citoplasmática de 29kD, la cual puede isomerizar maleiace-toacetato a fumarilacetoacetato⁶.

En el presente trabajo se realizó un estudio teórico con la idea de encontrar los posibles mecanismos de interacción de la GSTZ con varios α -haloácidos, de los cuales algunos presentan actividad tóxica y otros no; el estudio es implementado en medio vacío y solvatado para cuantificar la influencia del ambiente químico y los ligandos en sus configuraciones R y S para establecer la estéreo especificidad y estéreo selectividad del sitio de unión de la GSTZ hacia ellos.

También se realizó un esquema de reacción con el método semiempírico SAM⁷ entre los α -haloácidos y la GSTZ, con el fin de obtener información sobre las propiedades electrónicas de las moléculas.

Métodos computacionales

La estructura tridimensional de la glutatión z transferasa fue tomada del Protein Data Bank (www.rcsb.org/pdb), bajo

el código 1FW1⁸. A esta se le realizó un análisis de la estructura secundaria a partir de su estructura 3D con Promotif⁹, se implementó también un estudio energético que incluyó minimización energética en vacío y en medio acuoso explícito empleando el campo de fuerzas Tripos¹⁰, se calcularon los parámetros de accesibilidad superficial al solvente con WhatIf (<http://swift.cmbi.ru.nl/servers/html/index.html>), perfil lipofílico con el módulo Molcad, potencial electrostático molecular con APBS¹¹ y cavidades con potencial para alojar los ligandos α -haloalcanoicos con Pocket Finder¹². El sitio de unión de los ligandos a la proteína se preparó teniendo en cuenta las cavidades encontradas con Pocket Finder. El sitio activo se construyó seleccionando los aminoácidos que se encontraban a 6.5 Å alrededor de la molécula de glutatión en la estructura cristalina, optimizada en el vacío y en medio acuoso. Posterior a la caracterización del sitio activo se realizó un análisis conformacional con el módulo FlexX^{13,14}, cada ligando fue situado en 100 conformaciones diferentes dentro del sitio de unión de la proteína, y cada posición fue evaluada con cinco funciones: Total score del módulo FlexX; Chemscore¹⁵, D-score¹⁶, PMF-score^{17,18} y Gscore¹⁹ del módulo CScore²⁰. La valoración de cada ligando se implementó con la función de consenso Cscore, la cual asigna valores entre 0 y 5 para cada conformación del ligando en la cavidad, siendo un valor de 0 para una mala interacción del ligando y de 5 para una buena. El valor de aceptación para este estudio estuvo entre 5 y 4 para conformaciones diferentes con la misma valoración se empleó Chemscore como función discriminante.

Además se realizó un esquema de reacción con el método semiempírico SAM1⁷ entre los α -haloácidos y la GSTZ, con el fin de obtener información sobre las propiedades electrónicas de las moléculas. Los α -haloácidos estudiados fueron: ácido dibromoacético, ácido dicloroacético, ácido difluoroacético, ácido bromocloroacético, ácido bromofluoroacético, ácido dicloropropanoico y ácido cloropropanoico. Las reacciones se muestran en las Figuras 1 y 2; cuando los sustituyentes X e Y son halógenos iguales la molécula es un ácido α -dihalogenado diastereoisómero y cuando son diferentes se generan los enantiómeros R y S del ácido α -dihalogenado. Sin embargo en la reacción con glutatión, el átomo de carbono al cual se une el átomo de azufre es un centro quiral, por lo tanto se producirán dos enantiómeros como resultado de la unión al ácido α -dihalogenado de sustituyentes iguales y cuatro enantiómeros de sustituyentes diferentes.

Análisis y discusión de resultados

Análisis estructural

En la Tabla 1 se muestra la secuencia de la proteína IFW1, en ella se resalta el residuo Ser10, el cual es considerado como el responsable de la actividad catalítica. El modelo obtenido consta de 208 aminoácidos, un ión sulfato, una molécula de glutatión, una molécula de 2,3-dihidroxi-1,4-ditiobuano (DTT) y 109 moléculas de agua.

La proteína muestra que esta adopta el plegamiento canónico de las glutatión transferasas (Figura 3), el cual

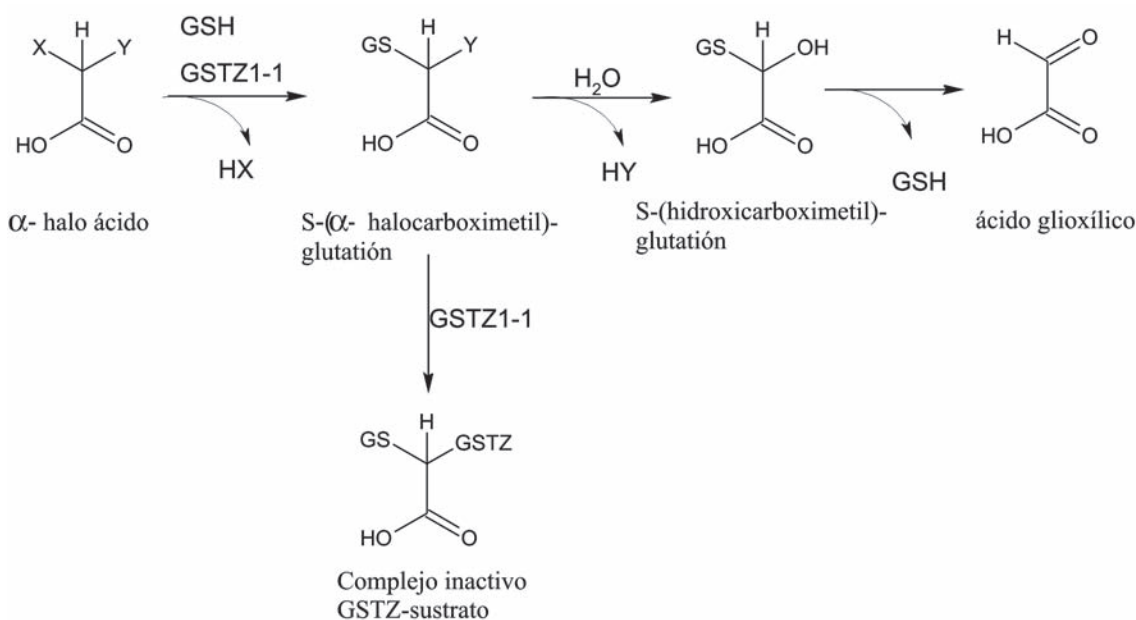


Figura 1. Reacción estudiada para los ácidos acéticos α -dihalogenados.

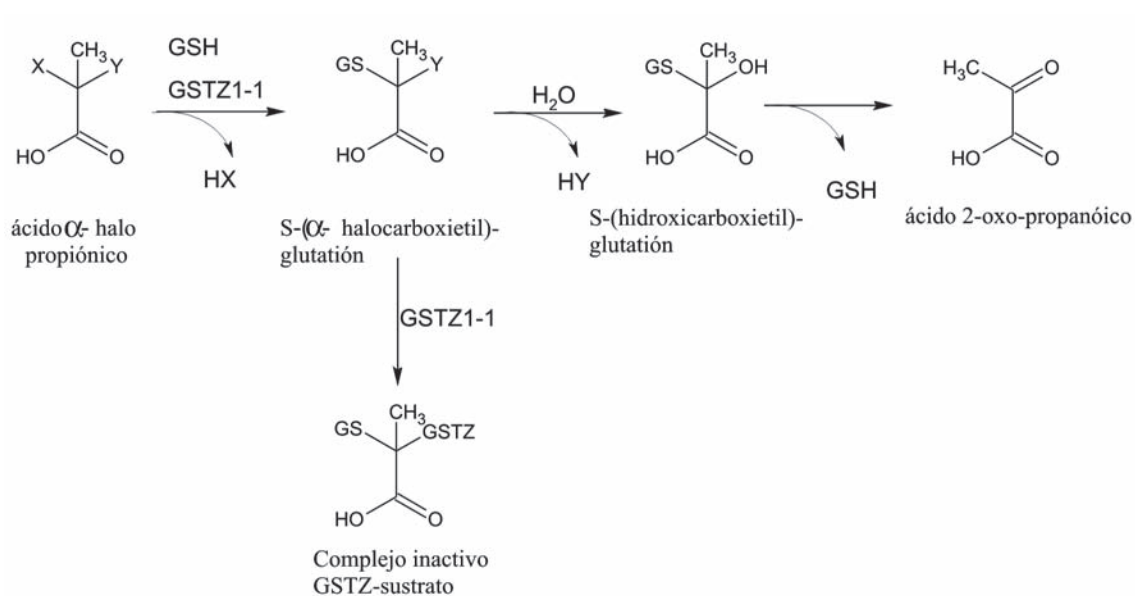


Figura 2. Reacción estudiada para el ácido propanoico mono y diclorado en posición α .

Tabla 1. Secuencia amonoacídica de la glutatión Z-transferasa, en código de una letra.

Estructura	Secuencia
1FW1	KPILYSYFRSSCSWRVRIALALKGIDYKTVPINLIKDGGQQFSKDFQALNPMKQVPTLKID GITHQSLAIIIEYLEETRPTRLLPQDPKKRASVRMISDLIAGGIQPLQNLVSKQVGEEMQL TWAQNAITCGFNALQILQSTAGIYCVGDEVMTADLCLVPQVANAERFKVDLTPYPTISSI NKRLLVLEAFQVSHPCRQPDPT

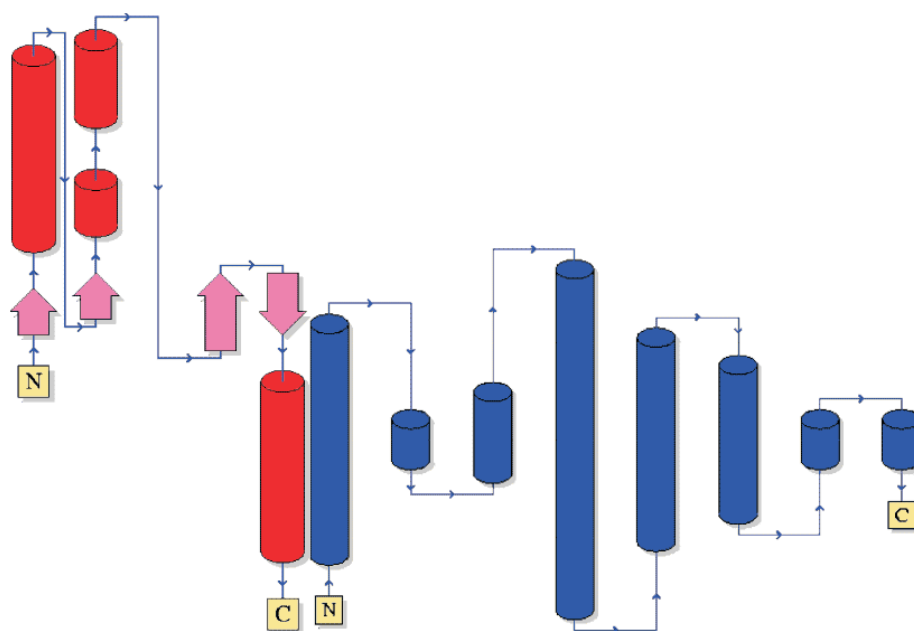


Figura 3. Plegamiento de la glutatión Z-transferasa. El dominio N-terminal (rojo) incluye las 4 hojas β y el dominio C-terminal (azul) consta de hélices α y 3-10

consta de dos dominios: uno N-terminal de tipo tioredoxina y otro C-terminal compuesto por hélices y loops. Los dominios están conectados por una región de 7 residuos (85 a 91)⁸.

Un análisis detallado de la estructura secundaria, a partir de la estructura 3D, obtenido con Promotif 3.01⁹, en general, indica que la proteína consta de 16 residuos en hojas- β , 105 en α -hélices, 13 en hélices 3-10 y los 74 restantes en zonas de loops.

Optimización de la estructura cristalina

Luego de obtener la estructura 3D de la proteína, se le adicionaron átomos de hidrogeno empleando el módulo Biopolymer de SYBYL 7.0 (www.tripos.com), el cual agrega los átomos de hidrógeno y pares solitarios definidos para cada residuo en el diccionario del módulo, la orientación de los átomos de hidrógeno se establece de forma que sea igual que en la definición del diccionario de residuos. El siguiente paso consistió en la eliminación del ión sulfato, la molécula de DTT y las moléculas de agua. Debido a la adición de hidrógeno y remoción de moléculas en la estructura cristalina fue necesario optimizar la estructura. Las condiciones del proceso de optimización se encuentran en la Tabla 2.

Para evaluar el efecto de la presencia de moléculas de agua en la proteína, esta se solató con una capa de 902 moléculas alrededor de la estructura, para lo cual se empleó el módulo SOLVATE de SYBYL; posteriormente se optimizó empleando las condiciones de la estructura no solvada.

El análisis de la proteína obtenido con Rampage²⁴ antes y después de las optimizaciones (Tabla 3) muestra algunos cambios ocurridos en la estructura. En general el proceso de optimización en vacío desplazó residuos de la

zona favorecida a las zonas permitida y prohibida diferentes a los del proceso de optimización en medio acuoso; solo fueron desplazados 9 residuos en común, de los cuales cabe destacar la glutamina 71 ya que siempre queda en la región prohibida, los 8 restantes caen dentro de las zonas permitidas.

Si bien el desorden estructural aumenta, la energía total de la estructura disminuye con el proceso de optimización (Tabla 4). Los parámetros que mayor influencia ejercieron en el cambio de energía de la estructura proteínica fueron la energía debida a las interacciones de van der Waals en átomos no enlazados y la energía por interacciones electrostáticas, siendo esta última menor en la estructura solvada por el fuerte aporte que ejercen las moléculas de agua.

Accesibilidad superficial al solvente

Adicional a la información obtenida con Rampage, se estimó con WHATIF (<http://swift.cmbi.ru.nl/servers/html/index.html>) el área superficial accesible al solvente (agua) o accesibilidad (en Å^2) por residuo de las estructuras sin optimizar y optimizadas. En las Figuras 4 y 5 se muestra el cambio acontecido debido al proceso de optimización, el cual fue evaluado de acuerdo con la ecuación:

$$\Delta a = a_{opt} - a_{cristal}$$

Donde a_{opt} representa la accesibilidad por residuo en la estructura optimizada y $a_{cristal}$ la accesibilidad por residuo de la estructura cristalina original sin ningún tipo de ligando ni moléculas de agua. La accesibilidad presenta menor variación en medio acuoso que en medio vacío, lo cual sugiere que las moléculas de agua le confieren estabilidad a la proteína, lo cual es acorde al hecho de que es una proteína citosólica.

Tabla 2. Condiciones generales de la optimización de 1FW1.

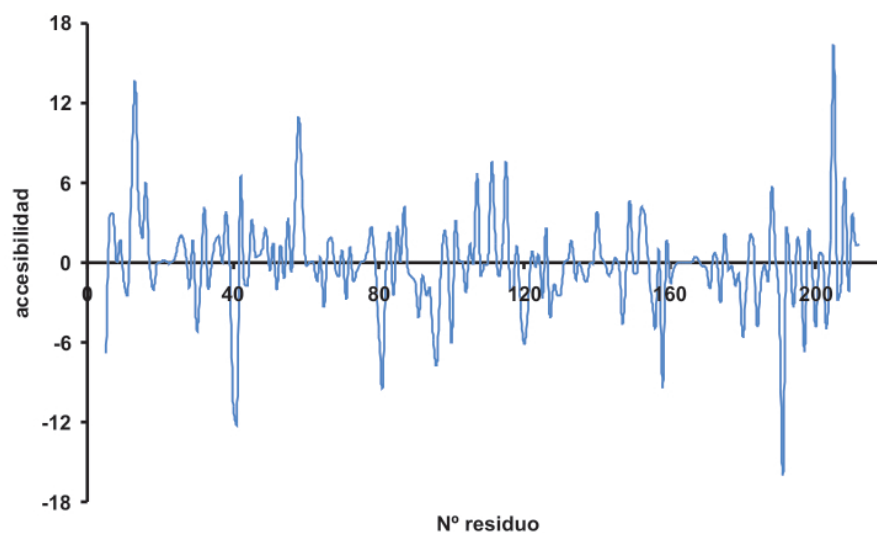
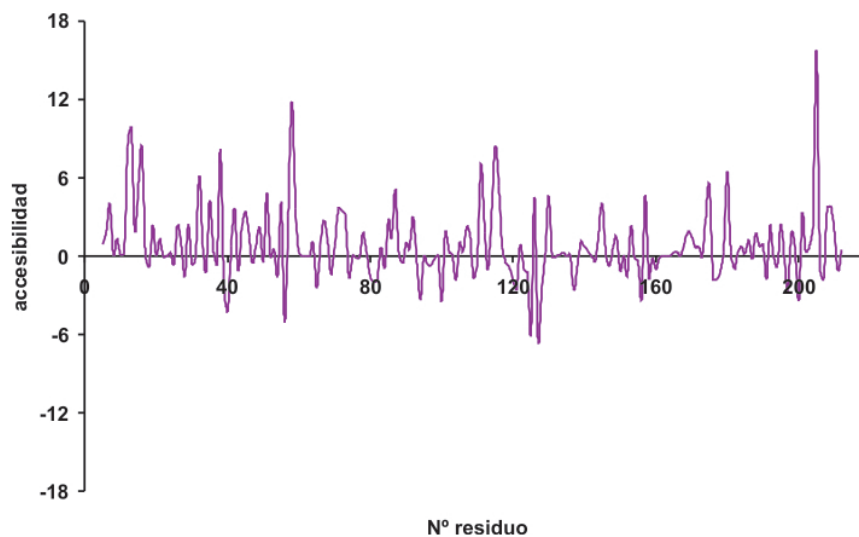
Campo de fuerza	Tripes ¹⁰
Cargas	Gasteiger-Marsilli ²¹
Método	Gradiente conjugado ^{22,23}
Optimización inicial	Simplex, 20 iteraciones ²³
Gradiente	0.05 (kcal/(Å)(mol)
Máximo desplazamiento	0.01 Å

Tabla 3. Resumen del diagrama de Ramachandran obtenido con Rampage.

Región	1FW1 no optimizada	1FW1 optimizada	1FW1 optimizada en agua
Favorecida	203 (98.5%)	184 (89.3%)	189 (91.7%)
Permitida	2 (1.0%)	20 (9.7%)	16 (7.8%)
Prohibida	1 (0.5%)	2 (1.0%)	1 (0.5%)

Tabla 4. Aspectos energéticos evaluados durante el proceso de optimización molecular de GSTZ (1FW1).

Energía del parámetro (Kcal/mol)	No optimizada	Optimizada en vacío	Optimizada en agua
Estiramiento de enlaces	380.372	80.492	87.468
Flexión angular	419.010	406.387	453.189
Torsional	535.889	469.031	477.724
Flexión fuera del plano	13.193	9.489	8.122
1-4 van der Waals	479.672	251.286	258.753
van der Waals	65820.965	-1569.864	-2950.343
1-4 Electrostática	1278.368	1253.370	1252.997
Electrostática	-1478.536	-1890.809	-5398.132
Total Energy	67448.935	-990.618	-5810.221

**Figura 4.** Cambio en la accesibilidad entre la proteína optimizada al vacío y sin optimizar.**Figura 5.** Cambio en la accesibilidad entre la proteína optimizada en medio acuoso y sin optimizar.

Un perfil lipofílico/hidrofílico asociado a la accesibilidad (ver Figura 6) señala el comportamiento superficial de la proteína en sus formas cristalina y optimizada, en concordancia con los resultados anteriores las estructuras que presentan mayor similitud son la proteína cristalina y la optimizada en medio acuoso.

La función de una proteína es definida por las interacciones que esta forme con otras proteínas y ligandos, por lo cual identificar la localización de los sitios de interacción con el ligando es fundamental²⁵. Parte del trabajo de caracterización de la glutatión γ transferasa consistió en la detección de cavidades o *pockets* que puedan

albergar los ligandos en estudio, para determinar estas cavidades se empleó el servidor en línea Pocket-Finder (<http://www.modelling.leeds.ac.uk/pocketfinder/>).

Cavidades

Como resultado del proceso de búsqueda de cavidades que permitiesen alojar los ácidos α -haloalcanoicos, se determinaron varios tamaños para estas. Pocket-Finder determinó 10 cavidades por estructura pero solo se tomó una ya que las demás no presentaban el volumen adecuado. Los resultados de esta búsqueda se muestran en la Tabla 5 y la Figura 7.

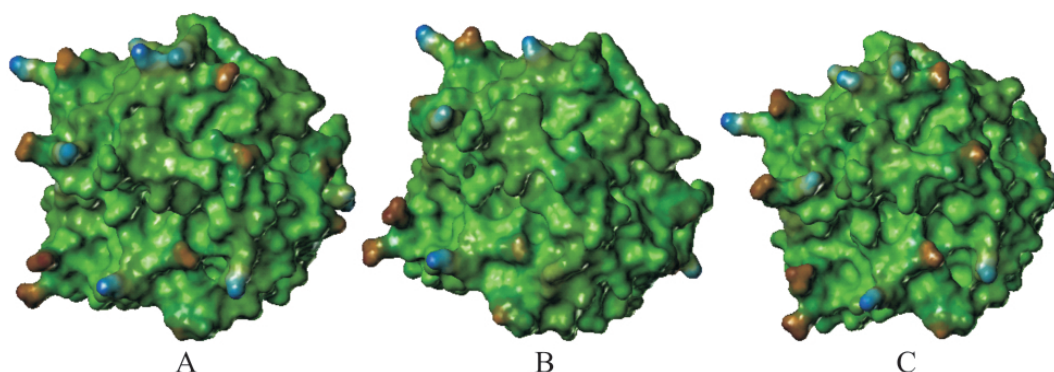


Figura 6. Diagramas de lipofilidad para la glutatión γ transferasa cristalina (A), optimizada en vacío (B) y optimizada en medio acuoso (C); el rango de colores va desde azul (hidrofílico) hasta café (lipofílico).

Tabla 5. Volumen predicho por Pocket-Finder para la proteína en sus formas cristalina y optimizada, y volumen de la cavidad seleccionada para alojar los ácidos α -haloalcanoicos.

Estructura	Volumen de la proteína (\AA^3)	Volumen cavidad (\AA^3)
Cristalina	20335	591
Optimizada en vacío	21452	393
Optimizada en medio acuoso	21352	706

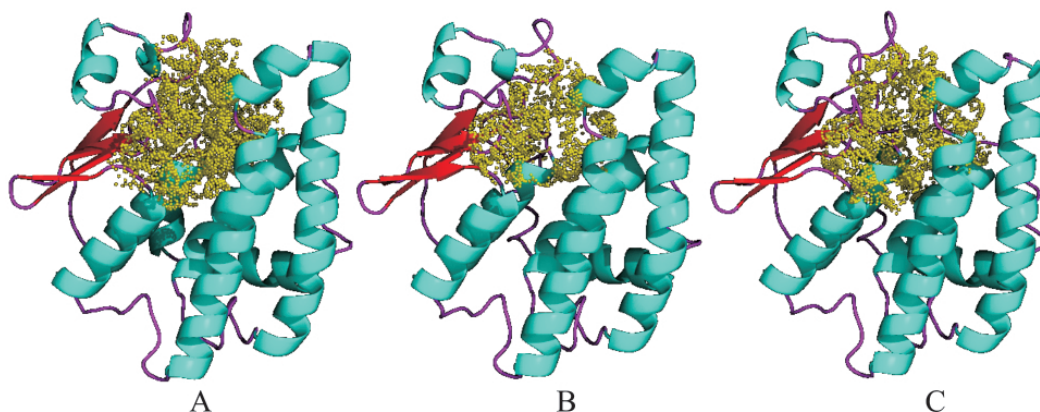


Figura 7. Cavidad elegida para implementar el docking molecular con los ácidos α -haloalcanoicos. Las Figuras A, B y C muestran la cavidad en la proteína cristalina, optimizada al vacío y optimizada en agua respectivamente. Las hélices se denotan en azul celeste, las hojas beta en rojo, los loops en magenta y la cavidad como puntos amarillos. La elección de la cavidad mostró ser la adecuada cuando se comparó con la estructura cristalina presentando el ligando (glutatión), como se aprecia en la Figura 8.

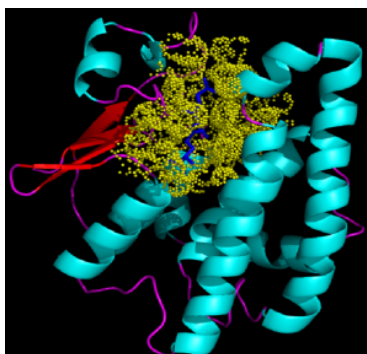
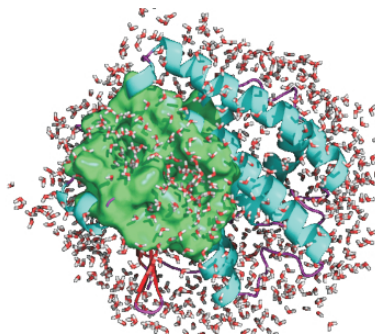
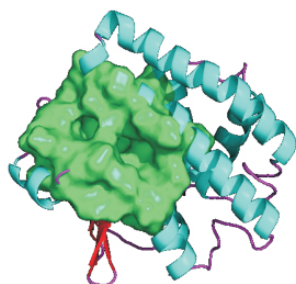


Figura 8. Representación de la estructura cristalina de la glutatión z transferasa con la cavidad (amarillo) y la molécula de glutatión (azul).

En la Tabla 6 se muestra la composición aminoacídica de la cavidad tomada como sitio activo hacia los ligandos α -haloalcanoicos. En ella se resaltan los residuos ILE 106 y GLN 114 en la estructura optimizada en vacío y GLY 42 en la optimizada en agua; estos residuos no son comunes en ambas estructuras; asimismo la estructura optimizada en vacío presenta un número mayor de aminoácidos (40) que la optimizada en agua (39). No obstante esta diferencia, el volumen del sitio activo en la estructura optimizada en agua fue mayor.

Tabla 6. Lista de residuos que conforman el sitio de unión entre la glutatión z transferasa y los ácidos α -haloalcanoicos.

1fw1 optimizada en vacío				1fw1 optimizada en agua			
#	Residuo	#	Residuo	#	Residuo	#	Residuo
11	TYR	60	PRO	11	TYR	59	VAL
13	ARG	70	HIS	13	ARG	60	PRO
14	SER	71	GLN	14	SER	70	HIS
15	SER	72	SER	15	SER	71	GLN
16	CYS	73	LEU	16	CYS	72	SER
17	SER	74	ALA	17	SER	73	LEU
18	TRP	75	ILE	18	TRP	74	ALA
19	ARG	106	ILE	19	ARG	75	ILE
20	VAL	107	ALA	20	VAL	107	ALA
36	ILE	108	GLY	36	ILE	108	GLY
38	LEU	111	GLN	38	LEU	111	GLN
43	GLY	112	PRO	42	GLY	112	PRO
45	GLN	114	GLN	43	GLY	115	ASN
46	PHE	115	ASN	45	GLN	116	LEU
50	PHE	116	LEU	46	PHE	117	SER
54	ASN	117	SER	50	PHE	118	VAL
56	MET	118	VAL	54	ASN	120	LYS
57	LYS	120	LYS	56	MET	172	ASN
58	GLN	172	ASN	57	LYS	175	ARG
59	VAL	175	ARG	58	GLN		



Potencial electrostático molecular (MEP)

La complementariedad entre proteína y ligando forman la base de la especificidad biológica. Las fuerzas fundamentales que determinan la especificidad por un ligando cargado son las interacciones electrostáticas, las cuales constituyen una fuerza impulsora fundamental subyacente en muchos procesos biológicos en escala molecular y desempeñan un papel importante en procesos de reconocimiento molecular, asociación intermolecular y propiedades moleculares^{26,27}. El potencial electrostático molecular es una poderosa herramienta que permite un acercamiento a fenómenos tales como procesos enzimáticos, interacciones proteína-proteína e interacciones ligando-proteína²⁸. Para elucidar el MEP de la glutatión *z* transferasa se empleó APBS¹¹ el cual resuelve numéricamente la ecuación no lineal de Poisson-Boltzmann. En la Figura 9 se muestran los mapas de MEP para la glutatión *z* transferasa no optimizada (sin ligandos), optimizada en vacío y en medio acuoso.

Debido a la alta constante dieléctrica del agua, se hace más evidente la separación de cargas en el MEP de la GSTZ obtenido en medio acuoso, lo cual facilita el ataque de electrófilos a las zonas con carga negativa y nucleófilos a

las zonas positivas; sin embargo este favorecimiento es disminuido por la presencia de moléculas de agua dentro del sitio activo, las cuales, a pesar de su movilidad pueden afectar la interacción del receptor con los ligandos.

Docking molecular

Para el cálculo del docking molecular se generaron 100 conformaciones para cada ligando dentro del sitio activo, el cual fue definido como todos aquellos residuos hallados a 6.5 Å alrededor de la molécula de glutatión en la respectiva estructura optimizada. Todos los enlaces simples del ligando se consideraron móviles. El algoritmo para el docking con FlexX hace que este coloque de forma automática los ligandos dentro del sitio activo predefinido, tomando en cuenta consideraciones geométricas y electrónicas, adicional a lo anterior la función consenso, Cscore, permite una evaluación más robusta y precisa de las mejores conformaciones del ligando y de las interacciones ligando- receptor²⁹.

En general, las funciones de evaluación son mejores para los ácidos α -halo alcanóicos que para glutatión lo que permite prever una mayor afinidad de unión; no obstante al comparar los resultados para la GSTZ optimizada

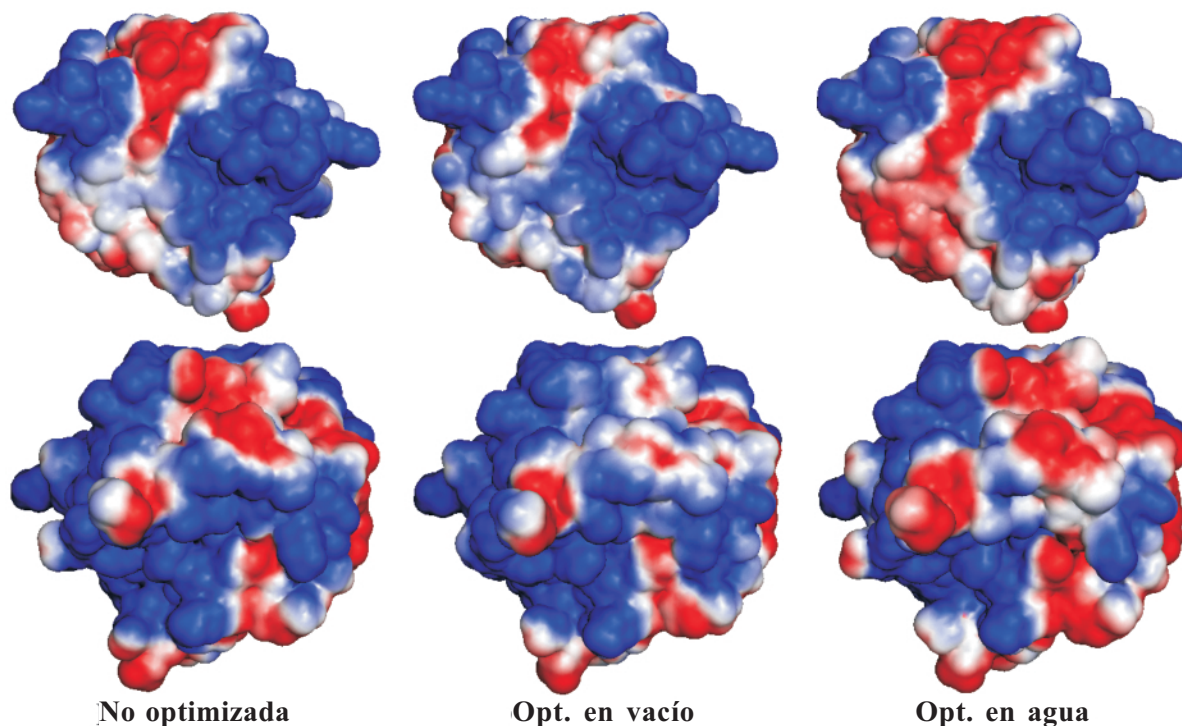


Figura 9. Vista *frontal* (arriba) y *posterior* (abajo) del mapa del MEP superpuesto a la superficie accesible al solvente de la glutatión *z* transferasa. El rango de valores del MEP abarca desde -1 (rojo) hasta +1 (azul), el blanco representa un valor de 0.

en vacío con la optimizada en agua algunos parámetros varían de manera apreciable (Totalscore y PMFscore), lo cual se debe a la presencia de moléculas de agua en el sitio activo, las cuales disminuyen el volumen disponible para generar las poses de cada ligando a la vez que generan interacciones polares con estos, sin embargo los resultados del docking se mantienen similares, lo cual se debe en parte a que FlexX no toma en cuenta las moléculas de agua presentes en el sitio activo para su evaluación.

Los resultados del docking, en ambiente vacío y solvatado, no revelaron estereoespecificidad ni estereoselectividad de la GSTZ hacia las mejores poses de los ligandos enantiómeros.

Glutación

El análisis de las poses que adopta la molécula de glutación dentro del sitio activo de la GSTZ optimizada en vacío muestra solo dos conformaciones y para la optimizada en agua muestra cuatro conformaciones, de las 100 obtenidas, que alcanzan el Cscore de 5. Comparando las funciones de evaluación para las poses en vacío (2 y 4) se observa que la pose 2 tiene un parámetro (Total score) mejor eva-

luado mientras que la pose 4 es mejor en los cuatro restantes. La evaluación de las poses en medio acuoso señala para la pose 21 dos parámetros significativamente mejor evaluados (Gscore y PMFscore).

La disposición espacial que toma la molécula de glutación en la estructura dilucidada por rayos X y como resultado del docking se muestra en la Figura 10, en ella se puede apreciar que como consecuencia del docking en vacío los residuo Gly y Cys del glutación se orientan en la misma dirección, en tanto que el residuo Glu se intercambia en ambas poses. El docking con la GSTZ solvatada arrojó como resultado 4 poses, tres de las cuales mantienen una orientación similar (13, 15 y 22) mientras que la restante (21) se orienta hacia otros residuos y en una conformación significativamente diferente. No obstante la disposición espacial de los átomos, las funciones de evaluación son ligeramente mejores en la estructura optimizada en vacío.

Cabe resaltar que las poses obtenidas con la GSTZ optimizada en vacío con una posición similar a glutación en la estructura obtenida por rayos X, la función de consenso arrojó valores poco fiables (≤ 3); estos resultados sugieren que la molécula de glutación puede tener una

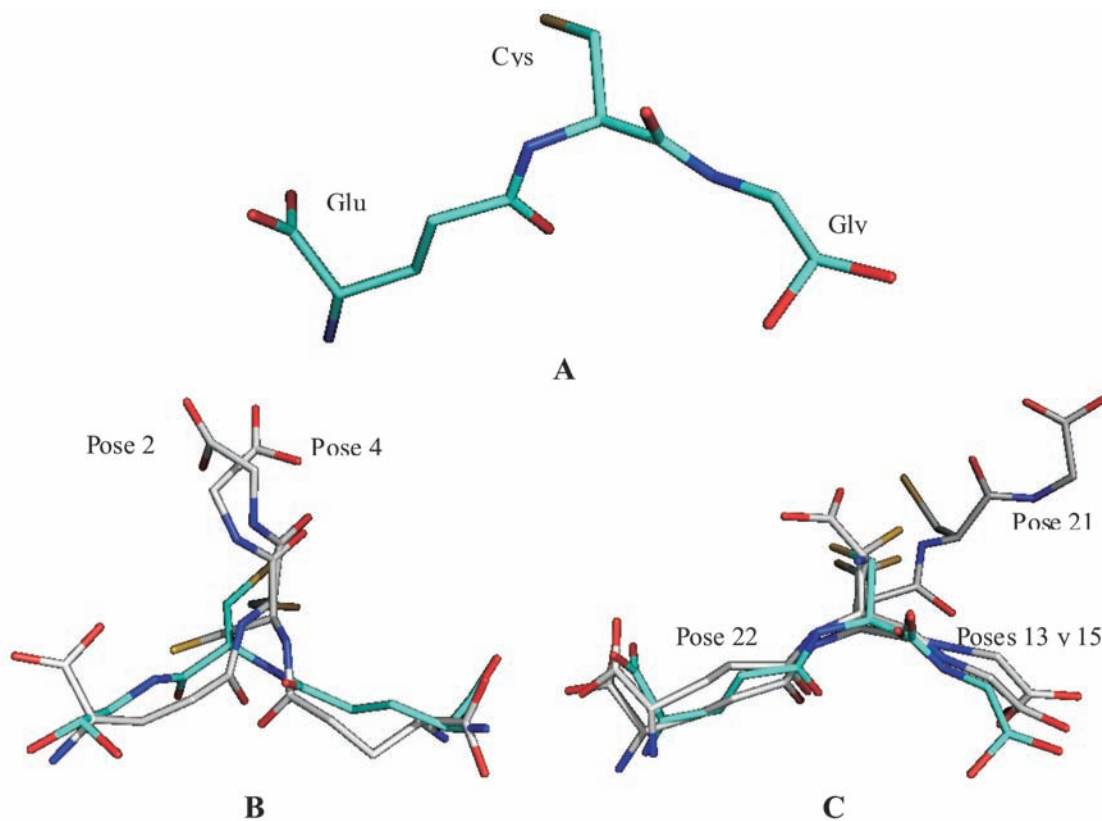


Figura 10. Residuos que componen la molécula de glutación (A) y poses que adopta en la estructura cristalina (azul), y como resultado del docking en medio vacío (B) y en medio acuoso (C).

movilidad dentro del sitio activo de modo que se generen poses con alta afinidad de unión pero con menor probabilidad de ocurrencia que otras poses con menor afinidad de unión. Puesto que las funciones de evaluación solo muestran el valor total de la función y no la contribución de cada parámetro interno de esta, no es posible discriminar que tipo de interacción ejerce mayor influencia en las poses obtenidas, por lo cual se hace necesario emplear otros recursos para determinar el número y la naturaleza de las interacciones entre los ligandos α -halo alcanóicos y los aminoácidos del sitio activo.

Las poses que adopta una molécula en un receptor son producto de las interacciones ligando-receptor, interacciones que dependen del par de átomos que entren en contacto. Para analizar los tipos y cantidad de contactos generados en las poses escogidas como resultado del docking molecular entre la GSTZ-glutación y la GSTZ-ácidos α -halogenados se empleó el servidor LPC/CSU (<http://ligin.weizmann.ac.il/cgi-bin/lpcsu/LpcCsu.cgi>), el cual evalúa los contactos interatómicos en biomoléculas y sus complejos de acuerdo con la siguiente clasificación atómica:

- Hidrofílicos (**I**). Nitrógenos y oxígenos que pueden donar y aceptar puentes de hidrógeno (ej. Oxígeno de grupos hidroxilo de residuos Ser o Thr).
- Aceptores (**II**). Nitrógenos u oxígenos que solo pueden aceptar un puente de hidrógeno.
- Donador (**III**). Nitrógenos que solo pueden donar un puente de hidrógeno.
- Hidrofóbicos (**IV**). Todos los átomos de carbono que no están presentes en anillos aromáticos ni están unidos covalentemente a nitrógeno u oxígeno y los halógenos cloro, bromo y yodo.
- Aromáticos (**V**). Átomos de carbono en anillos aromáticos, sin importar cualquier otro tipo de enlace del átomo.

- Neutros (**VI**). Átomos de carbono con enlace covalente a, al menos, un átomo hidrofílico o dos o más átomos aceptores; átomos metálicos; azufre, flúor y fósforo.
- Donadores neutros (**VII**). Átomos de carbono que poseen un enlace covalente con un solo átomo donador.
- Aceptores neutros (**VIII**). Átomos de carbono que poseen un enlace covalente con un solo átomo aceptor.

Así, los diferentes tipos de interacciones que se forman se clasifican en:

- contactos hidrofóbicos (Ph),
- puentes de hidrógeno (Hb),
- contactos aromático-aromático (Ar),
- contactos hidrofílico-hidrofóbico (HH),
- contactos aceptor-aceptor (AA),
- contactos donador-donador (DD),
- otros (-).

Los tipos de interacciones que se pueden generar al entrar en contacto los átomos del ligando con los del receptor se resumen en la Tabla 7.

De acuerdo con la clasificación anterior, el número y los tipos de interacciones de las mejores poses de la molécula de glutación y la GSTZ se resumen en la Tabla 8; también se muestran las interacciones con la GSTZ optimizada en medio vacío y optimizada en medio acuoso.

Las interacciones que contribuyen a estabilizar cada complejo son los puentes de hidrógeno (Hb), los contactos hidrofóbicos (Ph) y los contactos aromáticos; en tanto que los que lo desestabilizan son los contactos aceptor-aceptor

Tabla 7. Tipo de interacción generada para cada par atómico en contacto.

Clase atómica	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
I	Hb	Hb	Hb	HH	-	-	-	-
II	Hb	AA	Hb	HH	-	-	-	-
III	Hb	Hb	DD	HH	-	-	-	-
IV	-	HH	HH	Ph	Ph	Ph	Ph	Ph
V	-	-	-	Ph	Ar	-	-	-
VI	-	-	-	Ph	-	-	-	-
VII	-	-	-	Ph	-	-	-	-
VIII	-	-	-	Ph	-	-	-	-

Tabla 8. Interacciones determinadas para los diferentes complejos entre glutatión y GSTZ en medios vacío y acuoso.

Complejo \ Tipo de contacto	Hb	Ph	HH	AA	Otros
Optimizado en vacío	22	24	21	2	44
Pose-02 en vacío	17	19	15	4	40
Pose-04 en vacío	26	19	16	4	44
Optimizado en agua	36	15	25	4	44
Pose-13 en agua	25	14	18	7	65
Pose-15 en agua	27	13	22	7	61
Pose-21 en agua	24	13	18	2	48
Pose-22 en agua	20	10	15	8	70

(AA), donador-donador (DD) y contactos hidrofílico-hidrofóbico; las interacciones restantes, dependiendo del par atómico en contacto, pueden estabilizar o no el complejo. Los residuos del receptor que mayor participación por área adquieren en la interacción con glutatión se muestran en la Tabla 9, y en Tabla 10 se muestran los átomos de glutatión que presentan mayor número de contactos.

El residuo que mayor número de interacciones genera en la GSTZ optimizada (en ambos medios) es Gln 58, lo

cual es corroborado con los resultados del docking de la estructura optimizada en agua ya que las tres poses con posición similar (13, 15 y 22) a la de glutatión también tienen ese mismo residuo. Las poses restantes (en vacío y en agua) generan interacciones con residuos diferentes debido a su posición.

Los residuos de glutamina (Gln) señalados en la Tabla 9 presentan interacciones por su cadena lateral primordialmente.

Tabla 9. Residuos del sitio activo que presentan el mayor número de interacciones calculadas para los diferentes complejos entre glutatión y GSTZ en medios vacío y acuoso.

Complejo	Número de contactos por residuo					
	Residuo	#	Residuo	#	Residuo	#
Optimizado en vacío	Gln 58	16	Asn 115	9	Gln 111	9
Pose-02 en vacío	Leu 116	12	Gln 58	9	Gln 45	7
Pose-04 en vacío	Gln 111	11	Gln 71	10	Cys 16	10
Optimizado en agua	Gln 58	13	Gln 71	11	Val 59	8
Pose-13 en agua	Gln 58	18	Gln 71	11	Asn 115	9
Pose-15 en agua	Gln 58	18	Gln 71	11	Cys 16	10
Pose-21 en agua	Arg 175	11	Val 59	8	Cys 16	7
Pose-22 en agua	Gln 58	16	Asn 115	12	Gln 71	9

Tabla 10. Átomos de la molécula de glutatión que presentan el mayor número de contactos con los residuos del sitio activo.

Complejo	Número de contactos					
	Átomo	#	Átomo	#	Átomo	#
Optimizado en vacío	S 20	13	C 5	9	O 18	8
Pose-02 en vacío	O 14	9	S 20	8	O 18	7
Pose-04 en vacío	S 20	17	C 11	9	N 1	9
Optimizado en agua	N 1	14	O 18	11	S 20	10
Pose-13 en agua	O 15	14	S 20	12	O 19	9
Pose-15 en agua	O 15	14	C 13	12	O 19	9
Pose-21 en agua	C 6	13	C 13	9	C 11	9
Pose-22 en agua	O 15	11	S 20	11	C 12	10

Aductos s-(halocarboxialquil)-glutación

Las interacciones de las mejores poses de los ácidos α -halo alcanóicos (enlazados covalentemente a glutatión) y la GSTZ optimizada en vacío se resumen en la Tabla 11, y en la Tabla 12 se hallan los resultados con la GSTZ optimizada en medio acuoso; el número y tipo de interacciones para cada ligando difiere en los dos medios debido a la posición que toman, la conformación que adoptan y la presencia de moléculas de agua en el sitio activo de la estructura solvatada.

La superposición de las mejores poses de los ácidos α -halo alcanóicos, mostrada en la Figura 11, señala que la mayor variación se produce en los residuos ácido glutámico (Glu) y cisteína modificada (Cys- α -halo ácido) de la molécula del ligando, mientras que el residuo glicina (Gly) permanece con poca variación. Sin embargo, la orientación de estos compuestos dentro del sitio activo contrasta en gran medida con la posición que adopta la molécula de glutatión

en la estructura optimizada, ya que la posición de la cisteína y de la glicina se intercambia.

Las interacciones para los ligandos y la GSTZ optimizada en medio acuoso muestran una disminución en las interacciones hidrofóbicas y un aumento en la cantidad de puentes de hidrógeno y en las interacciones clasificadas como otras. Las moléculas de agua presentes en el sitio activo son responsables de este comportamiento, no obstante, debido a las poses que asumen los ligandos, las moléculas de agua que interactúan con estos son diferentes. Cabe destacar que a pesar de hallarse moléculas de agua dentro del sitio activo, los ligandos se pueden acomodar de manera tal que se favorece la afinidad de unión.

La orientación del residuo Gly de los ligandos se orienta principalmente hacia los residuos del receptor Asn 115, Leu 116, Ser 117, Asn 172 y Arg 175, y menos frecuente hacia los residuos Ser 15, Cys 16, Gln 45 y Phe 46.

Tabla 11. Tipos y cantidad de contactos generados por la interacción de la GSTZ optimizada en vacío y los ácidos α -halogenados.

Ligando	Hb	Ph	HH	AA	Otros
BrAc R-01	22	26	21	4	33
BrAc S-01	24	24	17	6	44
BrAc S-03	27	25	18	5	46
BrAc S-07	26	25	20	5	40
BrAc S-15	29	24	17	5	45
ClAc R-01	22	24	21	4	33
ClAc R-15	25	19	22	4	40
ClAc R-25	26	21	15	7	43
ClAc R-27	24	25	21	4	36
ClAc R-34	25	25	24	6	44
ClAc S-4	30	26	21	8	43
ClAc S-8	26	23	20	5	40
ClAc S-14	23	27	17	7	34
FAc R-07	27	18	19	5	44
FAc R-19	26	25	18	6	39
FAc S-01	22	22	19	4	37
FAc S-05	30	25	18	5	45
ClPr-R-07	28	29	29	3	46
ClPr-R-13	25	31	28	3	44
ClPr-R-16	25	35	26	3	42
ClPr-S-8	29	26	25	5	38
ClPr-S-13	26	23	16	7	39
ClPr-S-18	25	28	23	3	33
Pr-R-3	24	23	27	5	39
Pr-R-5	27	22	25	4	45
Pr-R-8	27	25	25	5	41
Pr-S-19	22	28	31	6	41

Tabla 12. Tipos y cantidad de contactos generados por la interacción de la GSTZ optimizada en agua y los ácidos α -halogenados.

Ligando / Tipo de contacto	Hb	Ph	HH	AA	Otros
BrAc R-12	25	14	26	9	65
BrAc R-16	36	13	22	5	67
BrAc S-01	25	16	26	8	69
BrAc S-02	30	17	25	10	60
BrAc S-04	24	18	20	11	59
BrAc S-06	25	16	22	10	61
BrAc S-14	34	15	23	6	64
ClAc R-10	28	14	31	6	69
ClAc R-13	36	13	23	5	67
ClAc S-02	30	18	23	10	60
ClAc S-03	24	18	19	11	59
ClAc S-04	25	15	27	9	66
ClAc S-08	29	15	20	11	72
ClAc S-16	36	16	23	5	67
ClAc S-18	30	16	24	6	72
ClAc S-19	37	17	23	6	74
FAc R-06	25	12	21	9	75
FAc R-08	27	13	15	10	83
FAc S-05	25	12	21	9	73
FAc S-09	36	10	16	5	77
FAc S-14	36	14	18	7	81
ClPr-R-02	33	27	40	6	45
ClPr-R-09	32	29	41	6	43
ClPr-R-10	37	25	35	6	42
ClPr-R-12	33	27	42	6	41
ClPr-R-14	30	23	33	5	40
ClPr-R-16	35	24	34	5	42
ClPr-R-26	36	25	34	5	42
ClPr-R-30	31	25	36	3	36
ClPr-R-33	31	24	40	2	44
ClPr-S-01	30	25	37	3	46
ClPr-S-02	26	27	46	3	45
Pr-R-13	32	29	39	2	38
Pr-S-19	38	24	34	6	43

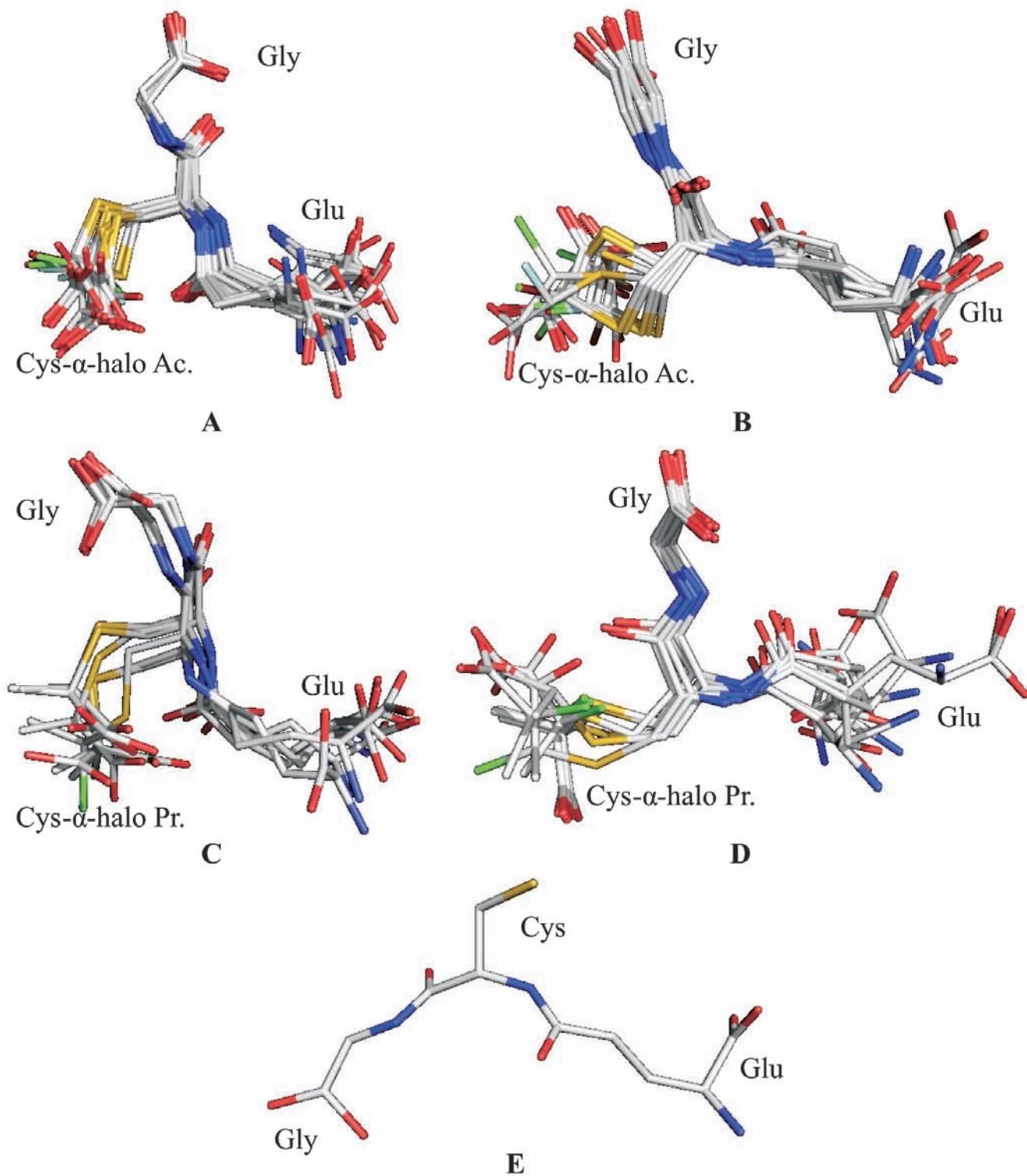


Figura 11. Superposición de las mejores poses de los ácidos α -halo acéticos obtenidos del docking en vacío (A) y en medio acuoso (B), y de los ácidos α -halo propanoicos en vacío (C) y en medio acuoso (D); pose que adopta la molécula de glutatión en la estructura elucidada por rayos X (E). Los átomos de carbono se muestran en color blanco, nitrógeno en azul, oxígeno en rojo y azufre en amarillo; se omiten los átomos de hidrógeno para una visualización mejor.

Los métodos computacionales basados en la mecánica molecular, como el docking, no permiten tomar en cuenta factores electrónicos los cuales son de suma importancia en las reacciones químicas; por esta razón se implementó un cálculo mecánico cuántico que resolviera de manera aproximada la formación de los ligandos y los complejos GSTZ-ligando.

Perfil de Reacción

Los esquemas de reacción estudiados involucraron las siguientes etapas:

Formación de los aductos de glutatión con ácidos α -halo acéticos

En esta etapa se simuló la reacción entre los ácidos dihalo acéticos (*a*) con glutatión (*b*), para formar el respectivo derivado enantiomérico S-(α -halocarboximetil)-glutatión (*c*) y un hidrácido (*d*), como se esquematiza en la Figura 12. La estructura molecular del reactivo *b* provino del proceso de docking molecular, la energía tomada para tal estructura fue el promedio de energías de las poses.

Las energías obtenidas, en medios vacío y acuoso, para los reactivos (*a* y *b*) y los productos (*c* y *d*) se hallan en la Tabla 13.

Tabla 13. Energías, en electronvoltios, obtenidas por medio del método semiempírico SAM1 para las moléculas involucradas en la reacción estudiada.

Compuesto	X ₁	X ₂	X ₃	Quiralidad	Vacío eV	Agua eV	ΔE eV
a	Br	Br	H	-	-1686.14	-1686.73	-0.59
a	Br	Cl	H	R	-1679,02	-1679,56	-0.54
a	Br	Cl	H	S	-1679,02	-1679,56	-0.54
a	Br	F	H	R	-1794,21	-1794,68	-0.46
a	Br	F	H	S	-1794,05	-1794,85	-0.80
a	Cl	Cl	H	-	-1671,88	-1672,37	-0.49
a	Cl	F	H	R	-1787,10	-1787,71	-0.61
a	Cl	F	H	S	-1786,97	-1787,58	-0.61
a	F	F	H	-	-1902,64	-1903,28	-0.64
a	Cl	Cl	CH ₃	-	-1853.73	-1854.20	-0.47
b	-	-	-	-	-4599,10	-4600,79	-1.69
c	-	Br	H	R	-5921,08	-5924,02	-2.95
c	-	Br	H	S	-5921,20	-5923,97	-2.77
c	-	Cl	H	R	-5913,85	-5916,74	-2.89
c	-	Cl	H	S	-5914,03	-5916,74	-2.71
c	-	F	H	R	-6028,81	-6031,78	-2.97
c	-	F	H	S	-6029,63	-6031,77	-2.14
c	-	Cl	CH ₃	R	-6096.49	-6098.51	-2.02
c	-	Cl	CH ₃	S	-6096.48	-6098.32	-1.85
c	-	Cl	H	R	-1529.12	-1529.69	-0.57
c	-	Cl	H	S	-1529.12	-1529.69	-0.57
c	-	H	CH ₃	R	-5771,83	-5773,88	-2,05
c	-	H	CH ₃	S	-5771,87	-5773,96	-2,09
d	Br	-	-	-	-363,78	-363,98	-0.20
d	Cl	-	-	-	-356,89	-357,08	-0.19
d	F	-	-	-	-472,51	-472,93	-0.42

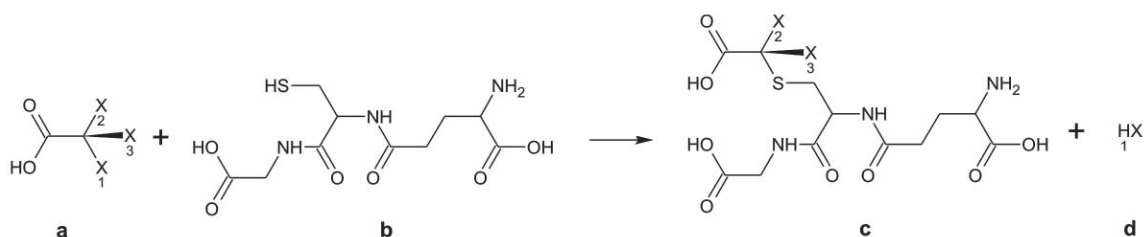


Figura 12. Reacción simulada para la formación de los ácidos α -halo alcanoicos. Si X_1 es Cl, Br o F, X_2 es Cl, Br o F y X_3 es H se forman aductos de ácidos α -halo acéticos unidos a glutatión; en tanto que si X_1 y X_2 son Cl o H y X_3 es CH_3 se producen aductos de ácidos α -cloro propanoicos enlazados a glutatión.

Cabe notar que el aducto **c**, puede ser generado de varias formas, así por ejemplo si X_2 es bromo (Br) en el aducto **c**, ese átomo de Br solo puede provenir de una molécula (**a**) que lo posea, las cuales son ácido dibromo acético, ácido bromocloro acético y ácido bromofluor acético. Si como producto de la reacción se produce cloruro o fluoruro de hidrógeno (**d**); entonces la quiralidad (R o S) proveniente de los ácidos bromocloro y bromofluor acéticos se mantiene en el aducto **c** (Figura 13), lo cual se debe a que el Br posee mayor número atómico que Cl y F.

Si contrario a la reacción anterior, el halógeno del hidrácido producido (**d**) es de mayor número atómico que el que hace parte del aducto **c**, entonces se invierte la quiralidad del centro (Figura 14).

El cambio de energía involucrado en la solvatación (ΔE en la Tabla 12) indica una mayor estabilidad de todas las moléculas cuando se encuentran inmersas en agua. Con base en las reacciones propuestas en la Figura 12, se determinó su energía de reacción en ambos medios, teniendo en cuenta los cambios mostrados en las Figuras 13 y 14, como un cambio de productos menos reactivos. Los resultados son mostrados en la Tabla 14.

$$\Delta E_{\text{reacción}} = E_{\text{productos}} - E_{\text{reactivos}}$$

Las energías de reacción positiva muestran una termodinámica inversa a la planteada, lo cual indica que la posibilidad de que la reacción proceda en la forma propuesta

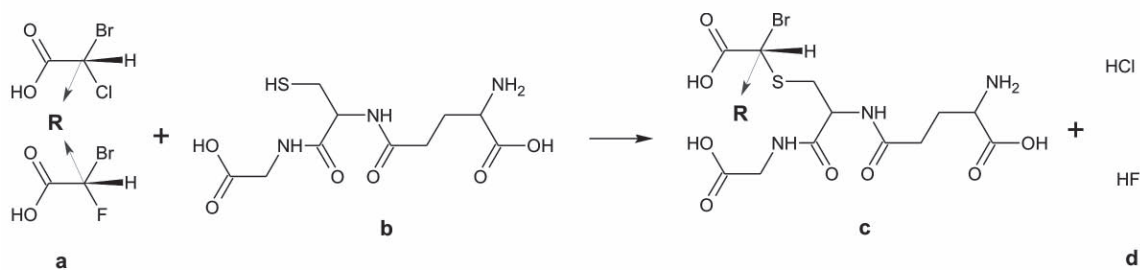


Figura 13. Conservación de la quiralidad proveniente del ácido acético hetero-dihalogenado en el aducto **c** (S-(halocarboximetil)-glutatión o S-(halocarboxietil)-glutatión).

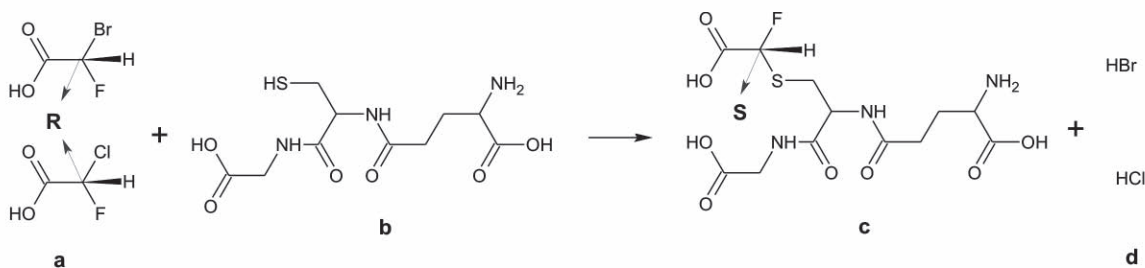


Figura 14. Cambio de la quiralidad proveniente del ácido acético hetero-dihalogenado en el aducto **c**.

Tabla 14. Energía de reacción para la formación de S-(halocarboximetil)-glutatin y S-(halocarboxietil)-glutatin.

Aducto	Quiralidad	Haloácido formado	Energía de reacción (eV)	
			en Vacío	en Agua
GS + BrAc	R	HBr	0,39	-0,48
		HCl	0,15	-0,75
		HF	-0,27	-1,48
	S	HBr	0,26	-0,43
		HCl	0,03	-0,70
		HF	-0,56	-1,26
GS + ClAc	R	HBr	0,49	-0,37
		HCl	0,23	-0,67
		HF	-0,16	-1,17
	S	HBr	0,31	-0,36
		HCl	0,06	-0,66
		HF	-0,47	-1,29
GS + FAc	R	HBr	0,56	-0,12
		HCl	0,37	-0,49
		HF	0,42	-0,64
	S	HBr	-0,10	-0,28
		HCl	-0,32	-0,35
		HF	-0,40	-0,62
GS + ClPr	R	HCl	-0,54	-0,60
	S	HCl	-0,54	-0,41
GS + Pr	R	HCl	0,35	0,58
	S	HCl	0,36	0,77

es poco probable, mas no así la reacción inversa. Los resultados muestran que la energía de reacción en vacío de S-(bromocarboximetil)-glutatin y S-(clorocarboximetil)-glutatin solo es favorable cuando el ácido acético α -halogenado reaccionante contiene flúor, para esto se necesita que se rompa un enlace C-F, el cual es muy energético. Cuando un producto de la reacción es S-(fluorocarboximetil)-glutatin, el cambio de energía, predice solo la formación del enantiómero S. Las reacciones antes mencionadas son todas favorables en medio acuoso.

La energía involucrada, en medios vacío y acuoso, en la formación de S-(clorocarboxietil)-glutatin es favorable cuando el reactivo de partida es ácido α -dicloropropanoico, y desfavorable cuando el reactivo es ácido α -cloropropanoico.

Transformación de los aductos s-(α -halocarboxialquil)-glutatin

La otra reacción estudiada en este trabajo comprendió la transformación de los S-(α -halocarboxialquil)-glutatin,

obtenidos en la reacción anterior, en S-(α -hidroxicarboxialquil)-glutatin como se muestra en la Figura 15.

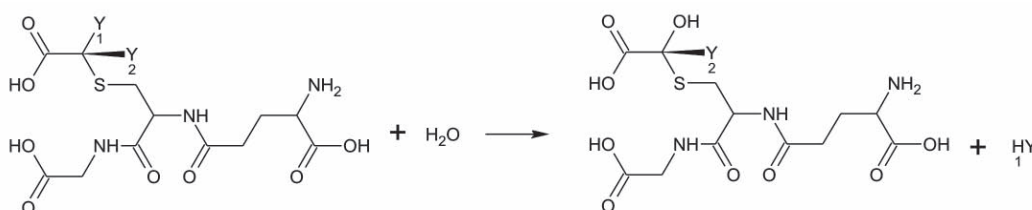
Los resultados obtenidos para la energía de reacción se hallan en la Tabla 15; en ellos se aprecia un favorecimiento general de la formación de S-(α -hidroxicarboxialquil)-glutatin en vacío, sin embargo en medio acuoso la reacción solo es posible cuando se emplea S-(α -fluorocarboximetil)-glutatin como reactivo. Este último hallazgo es acorde con los resultados experimentales, los cuales señalan que los ácidos α -fluor acéticos son metabolizados por la GSTZ.

Conclusiones

La optimización de la GSTZ y posterior comparación con la estructura de rayos X mostró variaciones en la distribución de estructuras secundarias, accesibilidad de los aminoácidos (incluso los del sitio activo), perfil lipofílico, potencial electrostático molecular; sin embargo, estos cambios son posibles ya que las moléculas son entes dinámicos que pueden presentar cambios a través del tiempo.

Tabla 15. Energía de reacción para la formación de S-(hidroxicarboximetil)-glutatión y S-(hidroxicarboxietil)-glutatión.

Compuesto	Quiralidad	Haloácido formado	Energía de reacción (eV)	
			en Vacío	en Agua
GS + OHAc	R	HBr	-0,66	0,41
		HCl	-0,99	0,03
		HF	-1,66	-0,78
	S	HBr	-0,55	0,28
		HCl	-0,84	0,05
		HF	-0,85	-0,87
GS + OHPPr	R	HCl	-0,16	0,89
	S	HCl	0,83	0,69

**Figura 15.** Reacción de transformación de los aductos S-(α -halocarboxialquil)-glutatión en S-(α -hidroxicarboxialquil)-glutatión; Y_1 puede ser Br, Cl o F y Y_2 es H o CH_3 .

A pesar de las diferencias numéricas en los valores de las funciones de evaluación y teniendo en cuenta el error asociado a la utilización de métodos derivados de la mecánica clásica los resultados de docking molecular fueron lo suficientemente adecuados para estimar la posible localización y conformación de los aductos formados entre glutatión y ácidos α -haloalcanoicos; estos resultados mostraron una apropiada complementariedad geométrica entre el sitio activo y los α -haloalcanoicos, no evidenciaron diferencias significativas con respecto a estereoselectividad y estereoespecificidad de la GSTZ hacia los ácidos α -haloalcanoicos. Adicionalmente los resultados sugieren que los ligandos estudiados tienen la suficiente movilidad dentro del sitio activo para generar poses con alta afinidad de unión pero con poca probabilidad de ocurrencia, lo cual puede deberse a la orientación que asumen algunos átomos de hidrógeno.

El número y tipo de interacciones ligando-proteína varían ampliamente con la disposición espacial y conformación de los ligandos. No obstante, en general, la orientación del residuo Gly de los ligandos, el cual presenta menor variación, se orienta principalmente hacia los residuos del receptor Asn 115, Leu 116, Ser 117, Asn 172 y Arg 175, y menos frecuente hacia los residuos Ser 15, Cys 16, Gln 45 y Phe 46.

Los resultados obtenidos con el método semiempírico SAM1 no muestran la formación forzosa de un enlace covalente entre los aductos α -haloalcanoicos y la GSTZ para que se produzca inhibición. La primera reacción estudiada muestra que en medio vacío solo se formarían los aductos S-(bromocarboximetil)-glutatión y S-(clorocarboximetil)-glutatión por la ruptura de un enlace carbono-flúor de alta energía. En medio acuoso la energía de reacción favorece la formación de todos los aductos S-(halocarboxialquil)-glutatión. La segunda reacción prevé la transformación de los aductos S-(halocarboxialquil)-glutatión en S-(hidroxicarboxialquil)-glutatión en medio vacío, sin embargo, la GSTZ es una proteína citosólica y por ende se halla embebida en un medio acuoso, para el cual la reacción muestra solo la posible ocurrencia de las reacciones que involucren S-(fluorocarboximetil)-glutatión, lo cual es acorde a la evidencia experimental.

En general el efecto del agua como medio solvente favorece las reacciones de los α -haloácidos en la transformación de los aductos S-(α -halocarboxialquil)-glutatión en S-(α -hidroxicarboxialquil)-glutatión. Los cálculos hechos en medio acuoso ayudan a entender mejor algunos aspectos desde el punto de vista electrostático del sitio activo de la molécula.

Referencias

1. **Sheehan D, Meade G, Foley VM y Dowd CA.** 2001. Structure, function and evolution of glutathione transferases: implications for classification of non-mammalian members of an ancient enzyme superfamily. *Biochemical Journal* **360**, 1-16.
2. **Hayes J D y Pulford, D. J.** 1995. The glutathione S-transferase supergene family: regulation of GST and the contribution of the isoenzymes to cancer chemoprotection and drug resistance. *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology* **30**, 445-600.
3. **Mannervik, B. y Danielson, H.** 1988. Glutathione transferases -structure and catalytic activity. *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology* **23**, 283-337.
4. **Board PG, Coggan M, Johnston P, Ross V, Suzuki T y Webb G.** 1990. Genetic heterogeneity of the human glutathione transferases: A complex of gene families *Pharmacology & Therapeutics*. **48**, 357-369.
5. **Shea TC, Clafin G, Comstock KE, Sanderson BJS, Burstein NA, Keenan EJ, Mannervik B y Henner WD.** 1990. Glutathione transferase activity and isoenzyme composition in primary human breast cancers. *Cancer Research* **50**, 6848-6853.
6. **Board PG, Anders MW y Blackburn AC.** 2005. Catalytic Function and Expression of Glutathione Transferase Zeta en Drug Metabolism and Transport: Molecular Methods and Mechanisms, Edited by: L. Lash Humana Press Inc., Totowa, NJ 85-107.
7. **Stewart JJP.** 2002. MOPAC 2002 Manual. Fujitsu Limited.
8. **Polekhina G, Board PG, Blackburn AC and Parker MW.** 2001. Crystal Structure of Maleylacetoacetate Isomerase/ Glutathione Transferase Zeta Reveals the Molecular Basis for Its Remarkable Catalytic Promiscuity. *Biochemistry* **40**, 1567-1576.
9. **Hutchinson, EG y Thornton, JM.** 1996. PROMOTIF - A program to identify structural motifs in proteins. *Protein Science*. **5**, 212-220.
10. **Clark M, Cramer RD y Van Opdenbosch.** 1989. Validation of the general purpose tripos 5.2 force field. *Journal of Computational Chemistry*. **10** (8), 982 - 1012.
11. **Baker NA, Sept D, Joseph S, Holst MJ, McCammon JA.** 2001. Electrostatics of nanosystems: application to microtubules and the ribosome. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. **98**, 10037-10041.
12. **Ruppert J, Welch W y Jain AN.** 1997. Automatic identification and representation of protein binding sites for molecular docking. *Protein Science* **6**(3), 524-533.
13. **Rarey M, Kramer B, Lengauer T and Klebe G.** 1996. A Fast Flexible Docking Method using an Incremental Construction Algorithm. *Journal of Molecular Biology* **261**, 470-489.
14. **Kramer B, Rarey M y Lengauer T.** 1999. Evaluation of the FLEXX incremental construction algorithm for protein-ligand docking. *Proteins: Structure, Function, and Genetics*. **37**(2) 228-241.
15. **Eldridge MD, Murray CW, Auton TR, Paolini GV y Mee RP.** 1997. Empirical scoring functions: I. The development of a fast empirical scoring function to estimate the binding affinity of ligands in receptor complexes. *Journal of Computer-Aided Molecular Design* **11**, 425-445.
16. **Kuntz ID, Blaney JM, Oatley SJ, Langridge R y Ferrin TE.** 1982. A geometric approach to macromolecule-ligand interactions. *Journal of Molecular Biology* **161**, 269-288.
17. **Muegge I y Martin YC.** 1999. A General and Fast Scoring Function for Protein-Ligand Interactions: A Simplified Potential Approach. *Journal of Medicinal Chemistry* **42**, 791-804.
18. **Muegge I.** 2006. PMF Scoring Revisited. *Journal of Medicinal Chemistry* **49**, 5895-5902.
19. **Jones G, Willett P, Glen R, Leach AR y Taylor R.** 1997. Development and Validation of a Genetic Algorithm for Flexible Docking. *Journal of Molecular Biology* **267**(3), 727-748.
20. **Wang R., Lu Y y Wang S.** 2003. Comparative evaluation of 11 scoring functions for molecular docking. *Journal of Medicinal Chemistry* **46**(12), 2287-2303.
21. **Gasteiger J, y Marsilli M.** 1980. Iterative partial equalization of orbital electronegativity - a rapid access to atomic charges. *Tetrahedron* **36**, 3219-3288.
22. **Hestenes M y Stiefel E.** 1952. Methods of Conjugate Gradients for Solving Linear Systems. *Journal of Research of the National Bureau of Standards* **49**, 409-436.
23. **Press W, Flannery B, Teukolsky S y Vetterling W.** 1992. Numerical Recipes in C - The Art of Scientific Computing, 2da Edition. Cambridge University Press, CONJUGATE GRADIENTS (p. 420), SIMPLEX (p. 430)
24. **Lovell S, Davis I, Arendall W III, de Bakker P, Word J, Prisant M, Richardson J y Richardson D.** 2002. Structure validation by Calpha geometry: phi,psi and Cbeta deviation. *Proteins: Structure, Function & Genetics*. **50**(3), 437-450.
25. **Laurie A. y Jackson R.** 2005. Q-SiteFinder: an energy-based method for the prediction of protein-ligand binding sites. *Bioinformatics* **21**(9):1908-1916.
26. **Ledvina PS, Yao N, Choudhary A. y Quioco FA.** 1996. Negative electrostatic surface potential of protein sites specific for anionic ligands. *Biochemistry*. **93**, 6786 -679.
27. **Hildebrandt A, Blossey R, Rjasanow S, Kohlbacher O. y Lenhof H.** 2006. Electrostatic potentials of proteins in water: a structured continuum approach. *Bioinformatics*. **23**, e99-e.
28. **Weiner PK, Langridge R, Blaney JM, Schaefer R y Kollman PA.** 1982. Electrostatic Potential Molecular Surfaces. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **79**, 3754-3758.
29. **Böhm HJ.** 1994. The development of a simple empirical scoring function to estimate the binding constant for a protein-ligand complex of known three-dimensional structure. *Journal of Computer-Aided Molecular Design* **8**(3), 243-256.

Recibido: agosto 19 de 2008.

Aceptado para su publicación: mayo 11 de 2009.

EVALUACIÓN RÁPIDA DE PECES ARRECIFALES Y SU RELACIÓN CON LA ESTRUCTURA DEL SUSTRATO EN LAS ISLAS DEL ROSARIO, ÁREA MARINA PROTEGIDA DEL CARIBE COLOMBIANO

Por

Oscar Delgadillo-Garzón¹ & Paula Zapata-Ramírez²

Resumen

Delgadillo-Garzón, O. & P. Zapata-Ramírez: Evaluación rápida de peces arrecifales y su relación con la estructura del sustrato en las Islas del Rosario, área marina protegida del Caribe colombiano. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **33**(127): 273-283, 2009. ISSN 0370-3908.

Se evaluaron las comunidades de peces y se realizó una caracterización del sustrato arrecifal en las islas del Rosario por medio de censos visuales, para determinar la posible relación entre estas dos variables. Se registraron un total de 106 especies de peces y cinco unidades ecológicas de paisaje coralino (UEPC), con algunas diferencias entre las estaciones insulares y los bajos externos, debido a variaciones en la estructura del sustrato, factores ambientales e influencia antrópica. Los valores más altos de riqueza, abundancia y diversidad se encontraron en una combinación de las UEPC Corales mixtos (Cmix), *Montastraea* (Mon) y Octocorales-Corales mixtos (Oct-Cmix), observadas principalmente en el Bajo Tortugas. Una mayor investigación es necesaria para ampliar el conocimiento sobre la diversidad de peces en los ecosistemas costeros y los factores ecológicos que condicionan su distribución.

Palabras clave: peces arrecifales, Unidades ecológicas de paisaje coralino (UEPC), riqueza, diversidad, amenazas, Área Marina Protegida, Islas del Rosario.

¹ Biólogo Marino, MoAm Monitoreos Ambientales. Calle 127A #53A-68, Apto 502, Niza IX, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: oskadelgadillo@gmail.com

² Estudiante de Postgrado, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICML), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Ap. Postal 1152, CP 77500 Cancún, Q. Roo, México. Correo electrónico: zapata@icmyl.unam.mx

Abstract

Reef fish communities and the characterization of the reef substrate were assessed through visual census in the Rosario islands, to establish the possible relationship between these two variables. A total of 106 fish species and five landscape coralline ecological units (LCEU) were recorded, with some differences between insular and offshore stations, owing to variations in the substrate structure, environmental factors and anthropogenic influence. The highest richness, abundance and diversity values were found in a combination of the LCEU mixed corals (Cmix), *Montastraea* (Mon) and Octocorals-mixed corals (Oct-Cmix), mainly observed in Bajo Tortugas. Most research is necessary to enhance the knowledge about fish diversity in the coastal ecosystems and the ecological factors that determines their distribution.

Key words: reef fishes, Landscape coralline ecological units (LCEU), richness, diversity, threats, Marine Protected Area, Islas del Rosario.

Introducción

En el Caribe de Colombia existen áreas coralinas en zonas continentales y oceánicas con aproximadamente 2845 km² de extensión. Estos ecosistemas de gran belleza escénica se caracterizan por ser muy diversos y productivos, prestándole a la sociedad un sinnúmero de servicios de importancia ambiental, económica y social (Díaz *et al.*, 2000; Burke & Maidens, 2005). Los peces, representantes característicos de los arrecifes, constituyen uno de los principales recursos marinos por su valor comercial y ecológico. Sin embargo, es evidente la rápida y constante reducción de sus poblaciones, debido a la sobre pesca, pérdida de hábitat y degradación ambiental (Jones *et al.*, 2004; Connolly *et al.*, 2005; Aronson & Precht, 2006).

La gran heterogeneidad espacial de los arrecifes coralinos y su relación con los peces, ha sido un tópico importante de investigación en la ecología de estos ecosistemas. En general, la distribución de los peces está condicionada por la interacción de factores como las características del sustrato, particularidades físico-químicas del arrecife, disponibilidad de alimento, refugio, reclutamiento, predación y cobertura coralina, entre los que se destacan el tipo de hábitat, además de la complejidad topográfica y estructural del arrecife, como los que tienen mayor incidencia en la estructuración de sus comunidades (Williams, 1991; McGehee, 1994; Bouchon-Navarro *et al.*, 2005).

Desde hace décadas en Colombia se han realizado investigaciones sobre peces arrecifales, estudiando su taxonomía y ecología en hábitats someros de diferentes sectores del Caribe (Acero, 1993; Mejía & Acero, 2002; Reyes-Nivia *et al.*, 2004 a), como el área de San Andrés y Providencia (Mejía & Garzón-Ferreira, 2000), la región de Santa Marta (Acero & Rivera, 1992; Reyes-Nivia *et al.*,

2004 b; Olaya-Restrepo *et al.*, 2008), y las Islas del Rosario y San Bernardo (Acero & Garzón, 1985, 1986; Mejía *et al.*, 1994). De otra parte, desde 1998 el Sistema Nacional de Monitoreo de Arrecifes Coralinos de Colombia (SIMAC), se encarga de hacer evaluaciones anuales de la diversidad en los arrecifes de diferentes sectores del Caribe y Pacífico (Rodríguez-Ramírez *et al.*, 2006), pero los resultados ecológicos de este seguimiento no han sido publicados en su totalidad y no se tiene un conocimiento actualizado del estado de dichos ecosistemas.

Esta investigación presenta una caracterización de las comunidades de peces y una descripción de los atributos estructurales más representativos del sustrato, registrados en una evaluación rápida de nueve formaciones arrecifales en las Islas del Rosario con diferente grado de incidencia antrópica, algunas de las cuales nunca han sido estudiadas y descritas en conjunto, con el objetivo de aportar información sobre la relación entre la diversidad de peces con su hábitat arrecifal, así como con algunas particularidades físicas de las estaciones dentro de un contexto ecológico.

Área de estudio

El Archipiélago de las Islas del Rosario es un complejo de 32 islas e islotes, con formaciones coralinas vivas adyacentes y bancos coralinos o alto-relieves “bajos”, que se extienden sobre la plataforma continental a una distancia considerable de la costa. Las islas se localizan a 52 km al suroccidente de la bahía de Cartagena entre las coordenadas 10° 02' – 10° 14' N y 75° 37' – 75° 57' W (Figura 1) y son un área marina protegida (AMP) del Parque Nacional Corales del Rosario y San Bernardo (PNNCRSB). Tienen una extensión aproximada de 166.7 km², con un área ocupada por formaciones coralinas de 85 km². La irregularidad de su relieve y su ubicación privilegiada con respec-

to a los factores ambientales, ha permitido el desarrollo de diversos ambientes y asociaciones biológicas, conformando una de las áreas coralinas más desarrolladas geomorfológica y estructuralmente del Caribe colombiano, en la que se pueden encontrar arrecifes franjeantes, de parche, montículos, tapetes coralinos y bancos coralinos (Díaz *et al.*, 2000; Cendales *et al.*, 2002; Pineda *et al.*, 2004).

El clima se encuentra influenciado por el régimen estacional de los vientos Alisios del NE, que determinan el patrón del oleaje y la intensidad de la contracorriente de Panamá, generando dos estaciones climáticas marcadas, época seca de diciembre a abril con vientos predominantes y fuerte oleaje, y la época de lluvias de mayo a noviembre, caracterizada por aguas calmas. La temperatura del agua es poco variable y oscila alrededor de 29°C, así como la salinidad, que mantiene valores promedio cercanos a 35, con ligeras oscilaciones en la época lluviosa (López-Victoria & Díaz, 2000; Cendales *et al.*, 2002; Zapata-Ramírez, 2005).

Materiales y métodos

Durante mayo y junio de 2004 se observaron las asociaciones de peces y se describieron las características estructurales más representativas del sustrato en nueve formaciones arrecifales de las Islas del Rosario distribuidas así: cinco estaciones insulares o adyacentes a las islas (Barú (BA), Isla Arena (IA), Isla Pavitos (IP), Isla Rosario (IR) e Isla Tesoro (IT)), y cuatro en los bajos externos, retirados de las islas (Bajo Casimba (BC), Bajo Rosario (BR), Bajo Tortugas (BT), y Bajo Tumba Brazo (TU)) (Figura 1; Tabla 1). Para hacer la evaluación de peces se utilizó el método de buceo errante, en donde los buzos nadan libremente en el sitio de muestreo por el tiempo que sea posible según las restricciones de buceo, registrando a las especies y su abundancia en categorías de \log_{10} (Schmitt & Sullivan, 1996). Aquí la metodología cambió y se em-

plearon 40 minutos de observación por buzo en cada estación, para registrar riqueza y abundancia de especies en la pendiente arrecifal externa, partiendo desde dos a cinco metros en las estaciones insulares, y desde los siete a diez metros en los bajos externos, entre las 10 a.m. y 2 p.m. Durante dichos buceos se hicieron reconocimientos rápidos para determinar las unidades ecológicas de paisaje coralino (UEPC), con anotaciones de las características del fondo como la cobertura relativa estimada de sustratos y elementos de la biota sésil dominante (Díaz *et al.*, 2000; López-Victoria & Díaz, 2000). Los peces y la biota sésil predominante se identificaron según la guía de Humann & Deloach (2002 a, b, c) y con las referencias de estudios previos en el sector.

Para los peces, se obtuvieron los promedios de abundancia por estación, el índice de diversidad de Shannon y Wiener (H'), y el de uniformidad de Pielou (J'). Debido a que los datos no se ajustaron a los principios de normalidad, se realizó la prueba de Kruskal-Wallis para determinar diferencias en abundancia por sitio, y entre las estaciones insulares con respecto a los bajos externos. Se utilizó el índice de Bray-Curtis (análisis de clasificación) para determinar patrones de distribución a partir de la matriz de especies/abundancia promedio por cada estación, utilizando el programa Primer 5® y StatGraphics 4.0® (Clarke & Warwick, 2001; Quinn & Keough, 2002).

Resultados

En los censos visuales realizados se registraron un total de 106 especies de peces pertenecientes a 62 géneros y 35 familias con una abundancia promedio total de 2470. La estación con mayor riqueza fue IA con 57 especies, seguida por IP y BT con 50. Mientras que en BT se observaron 394 individuos, seguido de BC con 310 e IA con 308. IA y BT presentaron los valores más altos de diversidad y uniformidad. Las cinco especies más abundantes en orden

Tabla 1. Nombre, ubicación, ámbito de profundidad en metros (RP) y distancia aproximada de la costa más cercana en kilómetros (DAC), de las estaciones de muestreo en las Islas del Rosario.

Estación	Coordenadas	RP (m)	DAC (km)
Bajo Casimba (BC)	10° 10' 54'' N - 75° 48' 09'' W	10 - 18	1.8
Bajo Rosario (BR)	10° 10' 33'' N - 75° 51' 13'' W	18 - 24	6.0
Bajo Tortugas (BT)	10° 05' 05'' N - 75° 52' 29'' W	10 - 27	12.4
Bajo Tumba Brazo (TU)	10° 12' 58'' N - 75° 46' 58'' W	7 - 14	3.5
Barú (BA)	10° 09' 07'' N - 75° 42' 15'' W	2 - 15	0.7
Isla Arena (IA)	10° 08' 59'' N - 75° 44' 05'' W	4 - 18	0.6
Isla Pavitos (IP)	10° 10' 30'' N - 75° 46' 17'' W	2 - 20	0.4
Isla Rosario (IR)	10° 09' 13'' N - 75° 47' 17'' W	5 - 20	0.5
Isla Tesoro (IT)	10° 14' 01'' N - 75° 44' 49'' W	3 - 15	0.4

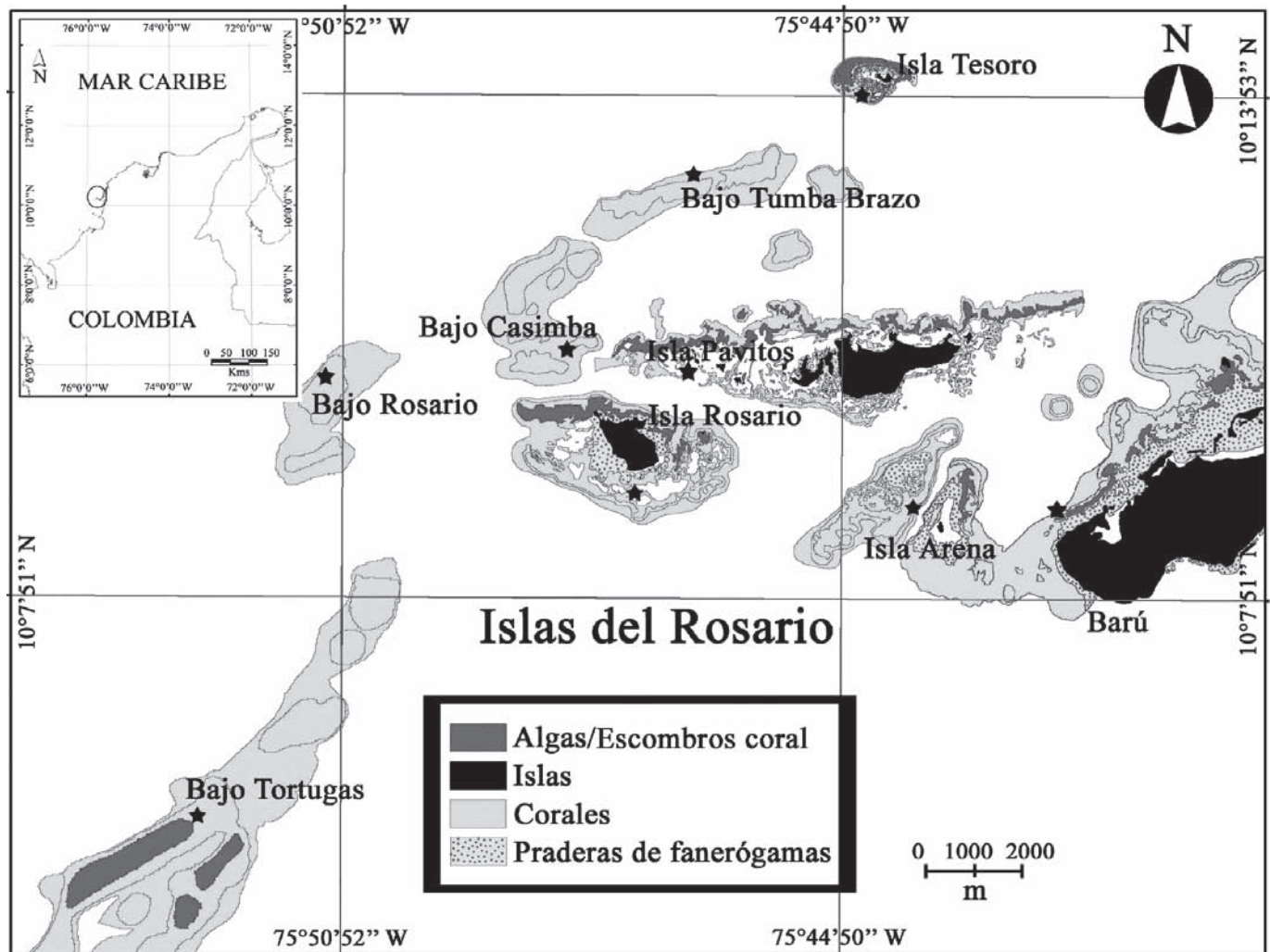


Figura 1. Área de estudio. Parque Nacional Natural Islas del Rosario con la ubicación de las nueve estaciones de muestreo (*). Se presentan tres coberturas diferentes: algas, corales y pastos marinos.

descendente fueron *Clepticus parrae* (10.82%), *Stegastes partitus* (7.71%), *Thalassoma bifasciatum* (6.68%), *Stegastes planifrons* (6.41%) y *Scarus iseri* (5.04%) con una ocurrencia del 100% (Tabla 2). Las familias Serranidae, Pomacentridae, Haemulidae, Labridae, Scaridae y Gobidae tuvieron los valores más altos de riqueza y abundancia. Por otra parte se encontraron 30 especies exclusivas en las diferentes estaciones, con el mayor número de estas en TU (7) e IA (5).

En general no se encontraron diferencias estadísticamente significativas de abundancia entre las estaciones ($H=6.19$; $p > 0.05$), y entre los bajos externos con respecto a las estaciones de las islas ($H=0.21$; $p > 0.05$). El análisis de clasificación formó dos grupos separados al 60% de

similitud. El grupo A conformado por las estaciones insulares, mientras que en el grupo B se agruparon los bajos externos (Figura 2).

Con respecto al componente bentónico se identificaron cinco tipos de UEPC (Tabla 3), distribuidas de la siguiente manera: BA e IP estuvieron representadas por la unidad *Agaricia tenuifolia* (Aten), con un alto porcentaje de algas filamentosas y *Halimeda* spp. BA presentó la mayor cobertura de arena, con alta y constante sedimentación, mientras que IP tuvo alta cobertura de esponjas. Por su parte, la unidad ecológica *Montastraea* spp (Mon) se apreció en las estaciones de IR e IT, con una alta cobertura de algas filamentosas y *Lobophora variegata*. Se observó en menor proporción la unidad Corales mixtos (Cmix) y Arena-Escom-

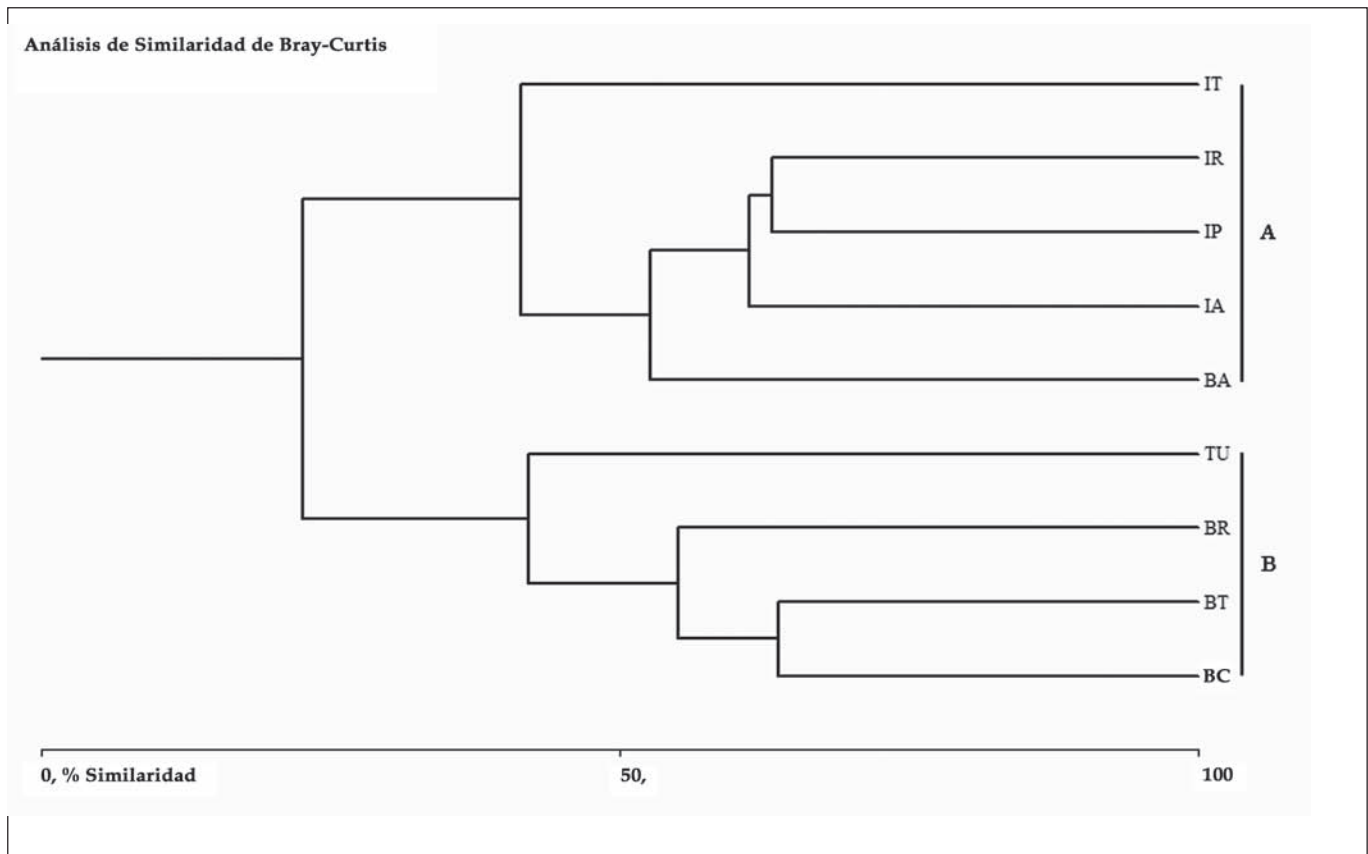


Figura 2. Análisis de clasificación (Similaridad de Bray-Curtis) basado en la composición y abundancia promedio de peces arrecifales en las Islas del Rosario (IT: Isla Tesoro; IR: Isla Rosario; IP: Isla Pavitos; IA: Isla Arena; BA: Barú; TU: Bajo Tumba Brazo; BR: Bajo Rosario; BT: Bajo Tortugas; BC: Bajo Casimba).

bros coralinos (Aresc). IA presentó a la unidad Cmix en los primeros metros para cambiar progresivamente a la unidad Mon. Las esponjas y la arena tuvieron una cobertura considerable, esta última especialmente después de los diez metros de profundidad. Las estaciones de los bajos externos estuvieron representadas por las unidades Cmix y Mon, con una proporción substancial de fondos arenosos, algas, esponjas y alta cobertura de octocorales, particularmente en BT, en donde fue evidente la presencia de la unidad Octocorales-Corales mixtos (Oct-Cmix).

Discusión

Las especies de peces observadas en esta evaluación fueron el 69.5% (89 especies en común) de las especies censadas por el SIMAC desde 1998 para esta zona (Reyes-Nivia et al., 2004 a). Como era de esperarse, un mayor número de especies registradas por el SIMAC no se hallaron en esta evaluación (39), mientras que aquí se reportan 17 peces no observados por el SIMAC (Tabla 2). Por su parte,

Acero & Garzón (1985, 1986) encontraron 227, y posteriormente se incluyeron 23 especies más (Garzón & Acero, 1988; Moreno & Torres, 1990; González et al., 1992; Torres et al., 1992; Acero et al., 1994; Mejía et al., 1994), entre las que se encuentran todas las especies de este estudio, a excepción del “pargo pluma” *Lachnolaimus maximus*, especie amenazada con categoría EN (En Peligro), la cual ha desaparecido prácticamente del archipiélago por la sobrepesca especialmente con arpón alrededor de la década de los setentas (Mejía & Acero, 2002; A. Acero, 2009 com. pers.). Por consiguiente, un individuo de *L. maximus* se reporta para las Islas del Rosario en el Bajo Casimba. Otras especies observadas en la misma categoría EN como *Balistes vetula*, en categoría VU (Vulnerable) como *Ginglymostoma cirratum* y NT (casi amenazada) como *Lutjanus analis* con la presencia de un solo individuo, se observaron principalmente en los bajos externos. Estos resultados son relevantes para el plan de manejo de los recursos en las islas, pues es evidente que dichas especies se encuentran en las zonas mas alejadas, con menor

Tabla 2. Lista de especies con su abundancia promedio por estación y total (BC: Bajo Casimba; BR: Bajo Rosario; BT: Bajo Tortugas; TU: Bajo Tumba Brazo; BA: Barú; IA: Isla Arena; IP: Isla Pavitos; IR: Isla Rosario; IT: Isla Tesoro; * Especies no reportadas por el SIMAC; + Nuevo reporte para el sector).

Peces	Estaciones									Total
	BC	BR	BT	TU	BA	IA	IP	IR	IT	
<i>Abudefduf saxatilis</i>	0	0	0	0	3.5	5.5	27.5	1	7.5	45
<i>Acanthemblemaria</i> sp.	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0.5
<i>Acanthostracion polygonius</i>	1	0	0	0.5	0	0.5	0.5	0	0	2.5
<i>Acanthostracion quadricornis</i>	0	0.5	0	0	0.5	1	1.5	0.5	0	4
<i>Acanthurus bahianus</i>	11	7	22	4.5	26	0.5	12.5	3.5	8.5	95.5
<i>Acanthurus chirurgus</i>	0	1	0	0	0.5	1	0	0	0	2.5
<i>Acanthurus coeruleus</i>	4	2	4.5	2.5	0	4.5	0.5	2	15	35
<i>Amblycirrhitus pinos*</i>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
<i>Anisotremus surinamensis</i>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
<i>Anisotremus virginicus</i>	0	1.5	0	1	0	0	1.5	0	0	4
<i>Aulostomus maculatus</i>	1.5	0.5	0	0	0.5	0.5	0.5	0	1	4.5
<i>Balistes vetula</i>	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0.5	1
<i>Bodianus rufus</i>	2.5	3	2.5	8.5	0.5	4.5	3	2	2	28.5
<i>Cantherhines pullus</i>	0	0	1	0.5	0	0	0	0	0	1.5
<i>Canthidermis sufflamen</i>	0	0	0	0	1	0	7.5	0	0	8.5
<i>Canthigaster rostrata</i>	1.5	1	0.5	1	0.5	2.5	1	0.5	0.5	9
<i>Carangoides ruber</i>	0	4.5	3.5	1	4.5	3.5	4.5	0.5	9	31
<i>Cephalopholis cruentata</i>	2	0.5	4.5	0.5	4	5.5	7	9	8	41
<i>Cephalopholis fulva</i>	0	1	3.5	0	0	0	0	0	0.5	5
<i>Chaetodon capistratus</i>	15	14	21	3	0	5.5	1	6.5	2	68
<i>Chaetodon ocellatus</i>	3	2	1.5	0.5	2	6.5	3	3	2	23.5
<i>Chaetodon striatus</i>	1	1	2	0	0	0	0	0.5	0.5	5
<i>Chromis cyanea</i>	33	4	22.5	8.5	0	14	1.5	1	25	109.5
<i>Chromis insolata</i>	9.5	2	23.5	0	0	0.5	0	0	0	35.5
<i>Chromis multilineata</i>	0	0	0	0	0	0.5	0	1	0	1.5
<i>Clepticus parrae</i>	41.5	80	8	17.5	2	28.5	36.5	7.5	46	267.5
<i>Coryphopterus dicrus</i>	0	0	0	0	0	0	0.5	0.5	0	1
<i>Coryphopterus glaucofraenum</i>	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0.5
<i>Coryphopterus personatus</i>	0	0	7.5	0	35	30	15	12.5	14.5	114.5
<i>Diodon holocanthus*</i>	0	0	0	0	0.5	0	0.5	0	0	1
<i>Diodon hystrix</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
<i>Echeneis naucrates*</i>	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0.5
<i>Elacatinus illecebrosus</i>	0	0	1	2.5	11	1.5	0	6	5.5	27.5
<i>Enchelycore carychroa*</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	1.5	1.5
<i>Equetus lanceolatus*</i>	0	0	0.5	0	0	1	0.5	0.5	0	2.5
<i>Equetus punctatus</i>	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0.5
<i>Gerres cinereus*</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
<i>Gnatholepis thompsoni</i>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
<i>Gamma loreto</i>	9.5	9	23	2.5	0	1.5	2.5	1	1	50
<i>Gymnothorax funebris</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
<i>Gymnothorax moringa*</i>	0	0	0	0	0.5	0	0.5	0	0	1
<i>Ginglymostoma cirratum*</i>	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0.5
<i>Haemulon aurolineatum</i>	0	1	3.5	1	7	17	2.5	0	1	33
<i>Haemulon carbonarium</i>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
<i>Haemulon flavolineatum</i>	4	3	11	10	5.5	5.5	2	4.5	1	46.5
<i>Haemulon macrostomum</i>	0	0	0	0	1	0.5	0	0	0.5	2
<i>Haemulon plumierii</i>	2	1.5	3	0	0	0.5	0.5	0.5	1	9
<i>Haemulon sciurus</i>	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2
<i>Haemulon striatum</i>	10.5	0	0	0	0	6	7.5	2.5	0	26.5
<i>Halichoeres bivittatus</i>	1	4.5	2.5	0	1.5	0.5	1	0	0	11
<i>Halichoeres garnoti</i>	11.5	7.5	24.5	1.5	2	5	2	1	4.5	59.5
<i>Halichoeres radiatus</i>	0	0	0.5	0.5	0	0	0	0	0	1

Continuación Tabla 2.

Peces	Estaciones									Total
	BC	BR	BT	TU	BA	IA	IP	IR	IT	
<i>Heteropriacanthus cruentatus</i>	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0.5
<i>Holacanthus ciliaris</i>	0.5	1.5	2	1.5	0	1.5	0.5	0.5	0	8
<i>Holacanthus tricolor</i>	4.5	5	5.5	3.5	0	0	0	0	1	19.5
<i>Holocentrus adscensionis</i> *	0	1.5	0.5	0	1.5	0.5	1.5	1.5	0.5	7.5
<i>Holocentrus rufus</i>	14.5	0	10	11	4.5	3.5	1.5	0.5	3	48.5
<i>Hypoplectrus nigricans</i>	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0.5
<i>Hypoplectrus puella</i>	5	3	4.5	0	6.5	6.5	2	4.5	2.5	34.5
<i>Hypoplectrus</i> sp. 1 tan hamlet	0	0	0	0	0	1	0	0	0.5	1.5
<i>Hypoplectrus</i> sp. 2	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0.5
<i>Hypoplectrus unicolor</i>	0	1.5	0	0	0.5	2	0	0.5	0.5	5
<i>Kyphosus incisor</i>	0	0	0	15	0	0	0	0	1.5	16.5
<i>Lachnolaimus maximus</i> +	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
<i>Lactophrys bicaudalis</i>	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0.5
<i>Lutjanus analis</i>	0	0	0.5	0	0	0	0.5	0	0	1
<i>Lutjanus apodus</i>	2.5	0	0.5	3.5	0	0	1	0	0.5	8
<i>Lutjanus chrysurus</i>	0	7.5	2	0	3.5	1	5.5	1	0	20.5
<i>Lutjanus griseus</i> *	0	0	0	0	0	1.5	0	0	0	1.5
<i>Lutjanus mahogoni</i>	0	1.5	0	0	0	1	0	0	3.5	6
<i>Melichthys niger</i>	0	15	12.5	22.5	0	0	0	0	0	50
<i>Micrognathus crinitus</i> *	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
<i>Microspathodon chrysurus</i>	1	0.5	0	6.5	1	0	1.5	0	1.5	12
<i>Monacanthus tuckeri</i> *	0	0.5	0	0	2.5	0	0	0	0.5	3.5
<i>Mulloidichthys martinicus</i>	1	3.5	1	2.5	0	2.5	0	0	3.5	14
<i>Mycteroperca tigris</i>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
<i>Mycteroperca venenosa</i>	0	0	0	0	0.5	0	0.5	0	0	1
<i>Myripristis jacobus</i>	4.5	1	0.5	1.5	0	2	1.5	1.5	0	12.5
<i>Neoniphon marianus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0.5
<i>Odontoscion dentex</i>	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5
<i>Ophioblennius atlanticus</i> *	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
<i>Pomacanthus arcuatus</i>	0	4	0	0	0	0	0	0	0	4
<i>Pomacanthus paru</i>	0.5	0	0.5	0	0	1	1	2	0	5
<i>Prognathodes aculeatus</i> *	0	1.5	0	0	0	0	0	0	0	1.5
<i>Pseudupeneus maculatus</i>	0.5	0	0.5	0	1	2	0	0	0	4
<i>Ptereleotris helenae</i>	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2
<i>Rypticus saponaceus</i>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
<i>Sargocentron vexillarium</i>	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0	0	2
<i>Scarus iseri</i>	14	9	18	6	16	23	16	15	7.5	124.5
<i>Scarus taeniopterus</i>	2	12.5	17.5	5	0	0	0	0	0	37
<i>Scomberomorus brasiliensis</i>	0	0.5	2	0	0	0	0	0	0	2.5
<i>Serranus tabacarius</i> *	0	0	0	0.5	0	5.5	0	0	0	6
<i>Serranus tigrinus</i>	6	4.5	9	1.5	1	6	0.5	13.5	0.5	42.5
<i>Serranus tortugarum</i>	0	0	0	12.5	0	7.5	0	0	0	20
<i>Sparisoma aurofrenatum</i>	3.5	12.5	15.5	5.5	3.5	12.5	1	8	5	67
<i>Sparisoma chrysopterus</i>	0.5	0	1	0.5	4	1	1	0	0	8
<i>Sparisoma radians</i> *	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
<i>Sparisoma rubripinne</i>	0	0	0	0.5	1.5	0	0	0	0	2
<i>Sparisoma viride</i>	7	8	14	36	3	5	7.5	5	3.5	89
<i>Sphyræna barracuda</i>	0	0	0	18.5	0	0	0	0	0	18.5
<i>Stegastes diencaeus</i>	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0.5	1
<i>Stegastes leucostictus</i>	2	0	0	0	0	1	0.5	1	3	7.5
<i>Stegastes partitus</i>	26.5	19.5	28	12.5	19.5	18	32.5	31	3	190.5
<i>Stegastes planifrons</i>	25.5	10.5	16.5	1.5	18.5	25	25	24.5	11.5	158.5
<i>Synodus intermedius</i>	0	0	0	0	0	1	1.5	0.5	0	3
<i>Thalassoma bifasciatum</i>	19.5	13	32	25	3	19	28	23	2.5	165
Total	310	291	394	266	204	308	276	205	216	2470

Tabla 3. Estación, ubicación, valores de riqueza total, abundancia promedio total, especies exclusivas (Exc.), diversidad (H'), uniformidad (J'), y unidades ecológicas de paisaje coralino (UEPC) en cada una de las estaciones evaluadas en las Islas del Rosario (BC: Bajo Casimba; BR: Bajo Rosario; BT: Bajo Tortugas; TU: Bajo Tumba Brazo; BA: Barú; IA: Isla Arena; IP: Isla Pavitos; IR: Isla Rosario; IT: Isla Tesoro).

Estación	Ubicación	Riqueza	Abun	Exc.	H'	J'	UEPC
BC	Bajos externos	44	310	4	1.35	0.82	Cmix, Mon
BR	Bajos externos	48	291	2	1.31	0.78	Cmix, Mon
BT	Bajos externos	50	394	2	1.44	0.84	Cmix, Mon, Oct-Cmix
TU	Bajos externos	47	266	7	1.38	0.82	Cmix, Mon
BA	Insular	43	204	3	1.31	0.79	Aten, Arena
IA	Insular	57	308	5	1.47	0.83	Cmix; Mon
IP	Insular	50	276	1	1.35	0.79	Aten, Esponjas
IR	Insular	45	205	4	1.36	0.81	Mon; Cmix; Aresc
IT	Insular	46	216	2	1.34	0.79	Mon; Cmix; Aresc

impacto antrópico, por lo cual se propone otorgar mayor atención, manejo y vigilancia a estos sectores, o en lo posible considerarlas zonas intangibles, con el propósito de cuidar y recuperar a las poblaciones de estas especies.

De otra parte, es de anotar que aquí no se hizo énfasis en especies de hábitos crípticos, así pues la representatividad de algunas familias como Apogonidae, Gobiidae, Blennidae y Chaenopsidae fue relativamente baja en comparación con otras evaluaciones. Entre tanto, las diferencias encontradas con el número de especies observadas por parte de **Aceró & Garzón** (1985, 1986) y el SIMAC, responden a un mayor esfuerzo de evaluación y a la utilización de técnicas destructivas como la rotenona con lo cual se pueden encontrar un mayor número de especies. No obstante, esta evaluación claramente muestra la importancia de hacer evaluaciones más extensas para conocer con certeza y amplitud la diversidad íctica actual de esta región del Caribe.

La riqueza encontrada durante esta corta evaluación es comparable con otros arrecifes del Caribe, como los atolones del sector de San Andrés y Providencia, la región de Santa Marta, Islas de San Bernardo (**Mejía & Garzón-Ferreira**, 2000; **Reyes-Nivia et al.**, 2004 a; **Olaya-Restrepo**, 2006), la península de Yucatán (**Nuñez-Lara et al.**, 2005), islas Vírgenes y Barbados (**Rakitin & Kramer**, 1996; **Chittaro**, 2002). En algunos de estos estudios, se reporta un número menor o igual de especies que en esta investigación, lo cual sugiere un alto valor de diversidad en las islas del Rosario, teniendo en cuenta el reducido esfuerzo de muestreo en comparación con las otras evaluaciones y el grado de degradación ambiental en el sector. En concordancia con estos trabajos, se obtuvieron los mismos resultados en cuanto a las especies y familias con mayor abundancia y riqueza, las cuales son características en los

arrecifes del Caribe. En cuanto a las unidades ecológicas, se encontraron los mismos patrones descritos por **Díaz et al.** (2000) y **Cendales et al.** (2002) en las estaciones evaluadas, aunque aquí se reportan dos UEPC menos que en los estudios anteriormente mencionados, como resultado del escaso esfuerzo y extensión en el área de muestreo.

La mayoría de las especies no registradas por el SIMAC, se observaron en sitios no valorados previamente como los bajos externos Casimba, Tumba Brazo, Rosario y Tortugas, y en las estaciones de Barú, Isla Arena e Isla Rosario. De estos lugares, el Bajo Tortugas presentó una abundancia de peces substancialmente mayor que los otros, alta riqueza y diversidad, respondiendo probablemente a la elevada cobertura coralina viva, aproximadamente 40%, además de tener un relieve heterogéneo con diferentes unidades ecológicas entre las que se destacan Cmix, Mon y Oct-Cmix, cuyas características son la gran diversidad de especies (**Díaz et al.**, 2000), concediéndole una mayor complejidad estructural y calidad del hábitat superior a la estación, con un efecto positivo sobre la diversidad y abundancia de peces, debido a un incremento en la disponibilidad de refugio y posibilidades alimenticias para las especies (**Eklund**, 1997; **Ferreira et al.**, 2001; **Mellin et al.**, 2006). De otra parte, su ubicación en el extremo sur occidental del archipiélago, cuyo inicio está aproximadamente a cinco kilómetros de las islas, probablemente disminuyó el efecto de los impactos costeros (i.e. descargas continentales, aguas servidas, sedimentación, contaminación), así como la presencia de los pescadores con su evidente incidencia en la comunidad de peces (**Russ**, 1991; **Burke & Maidens**, 2005; **Wilson et al.**, 2006), lo cual sustenta los resultados obtenidos.

En contraste, los menores valores encontrados en Barú corresponden a que este sector está ubicado cerca a las

descargas continentales y de aguas residuales, tiene la mayor población humana, un alto número de personas dedicadas a la pesca y presenta un prominente deterioro arrecifal, reflejado en la elevada sedimentación y cobertura de arena en comparación con las otras estaciones (**Díaz et al.**, 2000; **Cendales et al.**, 2002; **Zapata-Ramírez**, 2005), lo que repercute en la reducción de las variables estudiadas (**Guidetti et al.**, 2002; **Jones et al.**, 2004; **Burke & Maidens**, 2005).

Valores similares de abundancia se encontraron en las estaciones de isla Rosario e isla Tesoro, a pesar de ser declaradas zonas intangibles dentro del parque desde 1996, donde se encuentran restringidas las actividades náuticas, pesqueras y de turismo (**Pineda et al.**, 2004) y presenta tres UEPC, dos de las cuales se caracterizan por la alta diversidad. Estos resultados son contradictorios con lo reportado en diferentes reservas alrededor del mundo, en las que se ha observado un incremento considerable de la biodiversidad (**Rakitin & Kramer**, 1996; **Roberts**, 2000). Sin embargo, es probable que la fuerte presión pesquera, incluso ilegal (dinamita y boliche) a la que estuvieron expuestas en años anteriores (**Díaz et al.**, 2000; **Cendales et al.**, 2002; **Mejía & Acero**, 2002; **Camargo et al.**, 2009) y aún en la actualidad (isla del Rosario), debido a la carencia de una vigilancia constante y efectiva allí para regular este problema, no permitan una positiva recuperación del sustrato arrecifal y de las poblaciones de peces. Por otro lado, en la estación de IT donde existe vigilancia y se registró una alta cobertura coralina, el bajo número de individuos puede estar relacionado con las características homogéneas del arrecife, dominado principalmente por la unidad Mon, grandes cabezas de corales del género *Diploria* y *Colpophyllia*, y la unidad Aresc (**Zapata-Ramírez**, 2005), lo cual representa una menor complejidad estructural y geomorfológica, con un consecuente efecto en el ensamblaje de peces (**Glenn**, 2004; **Mellin et al.**, 2006; **Wilson et al.**, 2006). Así pues, es evidente que en la mayoría de los casos, la combinación de las UEPC C-mix, Mon y Oct-Cmix presentaron alta abundancia, riqueza y diversidad debido a una gran heterogeneidad en las características estructurales del paisaje.

Es de destacar que las zonas intangibles o reservas no pueden proteger los hábitats arrecifales de la degradación ambiental a gran escala (**Jones et al.**, 2004; **Aronson & Precht**, 2006), y su desempeño para la recuperación de los recursos marinos depende de la calidad del hábitat, la conectividad con los ecosistemas adyacentes y en especial, de la efectividad para su protección (**Roberts**, 2000), factores a tener en cuenta en los planes de manejo ambiental de las islas.

Las demás estaciones (BC, BR, BT, IP e IA) tuvieron niveles similares de todas las variables con ligeras variaciones, lo cual sugiere cierto grado de uniformidad de las asociaciones dentro del archipiélago en concordancia con la prueba de Kruskal-Wallis que no reveló diferencias significativas entre las estaciones. No obstante, se observó una aparente diferencia entre las comunidades presentes en los bajos externos, con respecto a los arrecifes insulares (análisis de clasificación), como una posible respuesta a su ubicación, factores como profundidad, movimiento del agua, características del sustrato, grado de desarrollo y complejidad estructural de las formaciones coralinas, que comúnmente afectan la distribución de las especies, como se ha observado en diferentes arrecifes alrededor del mundo (**McGehee**, 1994; **Bouchon-Navarro et al.**, 2005; **Mellin et al.**, 2006). Por otra parte, estas diferencias pueden ser evidencia del nivel de disturbio ambiental y antrópico al que han estado sometidas las comunidades, puesto que los ecosistemas costeros están particularmente expuestos y sujetos a múltiples impactos (**Wilson et al.**, 2006), y en el caso de las islas, especialmente a la sobrepesca, actividades náuticas y turismo, utilización directa de los corales como materiales para construcción, efectos de la sedimentación, escorrentía, descargas continentales, tormentas, cambios drásticos de la temperatura del agua, blanqueamiento, enfermedades y deterioro coralino (**Barrios**, 2000; **Díaz et al.**, 2000; **Restrepo et al.**, 2005; **Zapata-Ramírez**, 2005; **Camargo et al.**, 2009), algunos de los cuales ciertamente han generado un mayor impacto en los arrecifes insulares, lo que posiblemente ha provocado cambios en la estructura arrecifal y en las características ambientales de cada estación, afectando los patrones de distribución en los ensamblajes de peces.

Los resultados de esta evaluación, a juzgar por la alta diversidad de peces encontrada, el registro de especies que no habían sido observadas desde el trabajo de **Acero & Ferreira** (1985), el reporte de una especie no vista en anteriores evaluaciones en el área, y las relaciones documentadas entre los peces con algunos factores ambientales y antrópicos, demuestran la necesidad de hacer mayores esfuerzos de investigación para evaluar la diversidad íctica en las zonas arrecifales de Colombia, así como en hábitats esenciales como los bosques de manglar y pastos marinos, con el fin de establecer el grado de conectividad entre estos ecosistemas costeros, los factores ecológicos y el impacto de los disturbios tanto naturales como antrópicos, que determinan la distribución y dinámica de las comunidades de peces, en favor de un manejo adecuado y conservación de los recursos marinos en estos hábitats.

Agradecimientos

Al proyecto “Análisis histórico de las actividades humanas sobre los ambientes coralinos del Caribe Colombiano” desarrollado por el programa de Biodiversidad y Ecosistemas Marinos (BEM) del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR), por el soporte logístico y financiero para realizar esta evaluación. A Rafael Vieira del CEINER por su hospitalidad, a Jaime Rojas por la colaboración y buena disposición en el trabajo de campo, y a Carlos Alberto Flórez por la elaboración del mapa.

Bibliografía

- Acero, A.** 1993. Una mirada a los peces comerciales del Caribe colombiano. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, **22**: 129-135.
- Acero, A. & J. Garzón-Ferreira.** 1985. Peces de las Islas del Rosario y San Bernardo (Colombia). I. Característica del área y lista de especies. *Actual. Biol.*, **14** (54): 137-148.
- Acero, A. & J. Garzón-Ferreira.** 1986. Peces de las Islas del Rosario y de San Bernardo (Colombia) II. Tres nuevos registros para el caribe sur y 16 más para la costa norte continental colombiana. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, **15-16**: 2-29.
- Acero, A. & M. Rivera.** 1992. Peces de las familias Chaetodontidae y Pomacanthidae en la región de Santa Marta (Colombia): densidad y relación con la calidad del arrecife. *Carib. J. Sci.*, **28** (3-4): 184-190.
- Acero, A., A. Rodríguez-Ramírez y J. Garzón-Ferreira.** 1994. *Nomeusgronovii* (Gmelin) (Pisces: Nomeidae) en el Caribe colombiano: primer registro para la costa noroccidental de América del Sur. *An. Inst. Invest. Mar. Punta Betín*, **23**: 173-176.
- Aronson, R. B. & W. F. Precht.** 2006. Conservation, precaution, and Caribbean reefs. *Coral Reefs*, **25**: 441-450.
- Barrios, L. M.** 2000. Evaluación de las principales condiciones de deterioro de los corales pétreos en el Caribe colombiano. Monografía, M. Sc. Biol. Mar. Univ. Nal. de Colombia. Santa Marta, 160 p.
- Bouchon-Navarro, Y., C. Bouchon, M. Louis & P. Legendre.** 2005. Biogeographic patterns of coastal fish assemblages in the West Indies. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **315**: 31-47.
- Burke, L. & J. Maidens.** 2005. Arrecifes en peligro en el Caribe. World Resources Institute. Washington D. C. 82 p.
- Camargo, C., J.H. Maldonado, E. Alvarado, R. Moreno-Sánchez, S. Mendoza, N. Manrique, A. Mogollón, J.D. Osorio, A. Grajales y J.A. Sánchez.** 2008. Community involvement in management for maintaining coral reef resilience and biodiversity in southern Caribbean marine protected areas. *Biodivers. Conserv.*, **18** (4): 935-956.
- Cendales, M. H., S. Sea & J. M. Díaz.** 2002. Geomorfología y unidades ecológicas del complejo de arrecifes de las Islas del Rosario e Isla Barú (Mar Caribe, Colombia). *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, **26** (101): 497-510.
- Chittaro, P. M.** 2002. Species-area relationships for coral reef-fish assemblages of St. Croix, US Virgin Islands. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **233**: 253-261.
- Clarke, K. R. & R. M. Warwick.** 2001. Changes in marine communities. An approach to statistical analysis and interpretation. 2nd edition. Plymouth, United Kingdom. 136 p.
- Connolly, S. R., T. Hughes, D. Bellwood & R. Karlson.** 2005. Community structure of coral and reef fishes at multiple scales. *Science*, **309**: 1363-1365.
- Díaz, J. M., L. Barrios, M. Cendales, J. Garzón-Ferreira, J. Geister, M. López-Victoria, G. Ospina, E. Parra-Velandia, J. Pinzón, B. Vargas-Angel, F. Zapata, & S. Zea.** 2000. Áreas coralinas de Colombia. INVEMAR, Santa Marta, Serie de Publicaciones Especiales, **5**: 176 p.
- Eklund, A.** 1997. The importance of post-settlement predation and reef resource limitation on the structure of reef fish assemblages. En: Lessios, H. & Macintyre, I. (Eds.). Proceedings of the 8th International Coral Reef Symposium, **2**: 1139-1142.
- Ferreira, C. E., J. E. Goncalves & R. Coutinho.** 2001. Community structure of fishes and habitat complexity on a tropical rocky shore. *Env. Biol. Fish.*, **61**: 353-369.
- Garzón, J. y A. Acero.** 1988. A new species of *Lythrypnus* (Pisces: Gobiidae) from the tropical western Atlantic. *Bull. Mar. Sci.*, **43** (2): 308-314.
- Glenn, R. A.** 2004. Does increased habitat complexity reduce predation and competition in coral reef fish assemblages? *OIKOS* **106**: 275-284.
- González, E., A. Mora, I. Restrepo & C. Valencia.** 1992. Notas preliminares sobre la ictiofauna en una pradera de *Thalassia testudinum* Koning, (Cocoliso, Caribe colombiano). Mem. VIII Sem. Nac. Cienc. Tecnol. Mar. Santa Marta, **2**: 630-639.
- Guidetti, P., G. Fanelli, S. Frascchetti, A. Terlizzi & F. Boero.** 2002. Coastal fish indicate human-induced changes in the Mediterranean littoral. *Mar. Environ. Res.*, **53**: 77-94.
- Humann, P. & N. Deloach.** 2002 a. Reef coral identification. New World Publications, Jacksonville, Florida. 481 p.
- Humann, P. & N. Deloach.** 2002 b. Reef creature identification. New World Publications, Jacksonville, Florida. 481 p.
- Humann, P. & N. Deloach.** 2002 c. Reef fish identification. New World Publications, Jacksonville, Florida. 481 p.
- Jones, G. P., M. I. McCormick, M. Srinivasan & J. V. Eagle.** 2004. Coral declines threatens fish biodiversity in marine reserves. *PNAS*, **101** (21): 8251-8253.
- López-Victoria, M. & J. M. Díaz.** 2000. Morfología y estructura de las formaciones coralinas del archipiélago de San Bernardo, Caribe Colombiano. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, **24** (91): 219-230.
- McGehee, M. A.** 1994. Correspondence between assemblages of coral reef fishes and gradients of water motion, depth, and substrate size off Puerto Rico. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **105**: 243-255.
- Mejía, L. & A. Acero.** (Eds.). 2002. Libro rojo de peces marinos de Colombia. INVEMAR, Instituto de Ciencias Naturales – Uni-

- versidad Nacional de Colombia, Ministerio del Medio Ambiente. Serie Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Bogotá, Colombia. 174 p.
- Mejía, L. S. & J. Garzón-Ferreira.** 2000. Estructura de comunidades de peces arrecifales en cuatro atolones del Archipiélago de San Andrés y Providencia (Caribe sur occidental). *Rev. Biol. Trop.*, **48** (4): 883-896.
- Mejía, L. S., O. D. Solano & A. Rodríguez-Ramírez.** 1994. Ocho nuevos registros para la fauna íctica de las islas del Rosario (Mar Caribe colombiano). *An. Inst. Invest. Mar. Punta Betín*, **23**: 189-192.
- Mellin, C., J. Ferraris, R. Galzin, M. Kulbicki & D. Ponton.** 2006. Diversity of coral reef fish assemblages: Modelling of the species richness spectra from multi-scale environmental variables in the Tuamotu Archipelago (French Polynesia). *Ecol. Model.*, **198**: 409-425.
- Moreno, M. P. & D. F. Torres.** 1990. Nuevos registros ícticos para las islas del Rosario. Caribe colombiano. *An. Inst. Invest. Mar. Punta Betín*, **19-20**: 209-211.
- Núñez-Lara, E., J. E. Arias-González & P. Legendre.** 2005. Spatial patterns of Yucatán reef fish communities: testing models using a multi-scale survey design. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **324**: 157-169.
- Olaya-Restrepo, J., M. C. Reyes-Nivia & A. Rodríguez-Ramírez.** 2008. Ensamblajes de peces arrecifales del área de Santa Marta y el Parque Nacional Natural Tayrona. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, **37** (1): 111-127.
- Pineda, I. J., L. A. Martínez, D. M. Bedoya, P. Catarroso & J. A. Rojas.** 2004. Plan de manejo del Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo, PNNCRSB. UAESPNN Territorial Costa Atlántica, Cartagena. 316 p.
- Quinn, G.P. & M.J. Keough.** 2002. Experimental design and data analysis for biologists. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom. 537 p.
- Rakitin, A. & D. L. Kramer.** 1996. Effect of a marine reserve on the distribution of coral reef fishes in Barbados. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **131**: 97-113.
- Restrepo, J. D., P. A. Zapata, J. M. Díaz, J. Garzón-Ferreira & C. B. García.** 2005. Fluvial fluxes into the Caribbean Sea and their impact on coastal ecosystems: The Magdalena River, Colombia. *Global Planet. Change*, **50**: 33-49.
- Reyes-Nivia, M. C., J. Garzón-Ferreira & A. Rodríguez-Ramírez.** 2004a. Peces asociados a formaciones coralinas de cinco áreas del Caribe colombiano: listado de especies y primeros registros para las áreas. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, **33**: 101-115.
- Reyes-Nivia, M. C., J. Garzón-Ferreira & A. Rodríguez-Ramírez.** 2004b. Depredación de coral vivo por peces en el Parque Nacional Natural Tayrona, Caribe colombiano. *Rev. Biol. Trop.*, **52** (4): 883-895.
- Rodríguez-Ramírez, A., C. Reyes-Nivia, R. Navas-Camacho, J. Vega-Sequeda, J. Olaya, G. Duque & J. Garzón-Ferreira.** 2006. Estado de los arrecifes coralinos en Colombia: 71-142. En: Informe del estado de los ambientes marinos y costeros en Colombia: Año 2005. INVEMAR, Serie Publicaciones Periódicas **8**. Santa Marta, Colombia.
- Roberts, C. M.** 2000. Selecting marine reserves locations: optimality versus opportunism. *Bull. Mar. Sci.*, **66** (3): 581-592.
- Russ, G. R.** 1991. Coral reef fisheries: effects and yields. 601-635. En: Sale, P. (Ed.) *The ecology of fishes on coral reefs*. Academic Press, San Diego, U.S.
- Schmitt, E. F. & K. Sullivan.** 1996. Analysis of a volunteer method for collecting fish presence and abundance data in the Florida Keys. *Bull. Mar. Sci.*, **59** (2): 404-416.
- Torres, D. F., A. Rodríguez, L. S. Mejía y C. A. Buitrago.** 1992. Las comunidades del bajo arrecifal profundo Imelda, Isla Barú, Caribe colombiano: VII. Evaluación preliminar de la ictiofauna. *Mem. VIII. Sem. Nac. Cienc. Tecnol. Mar.* **1**: 350-369.
- Williams, D. McB.** 1991. Patterns and processes in the distribution of coral reef fishes. 437-474. En: Sale, P. (Ed.) *The ecology of fishes on coral reefs*. Academic Press, San Diego, U.S.
- Wilson, S. K., N. A. Graham, M. S. Pratchett, G. P. Jones & N. V. Polunin.** 2006. Multiple disturbance and the global degradation of coral reefs: are reef fishes at risk or resilient?. *Glob. Change Biol.*, **12**: 2220-2234.
- Zapata-Ramírez, P. A.** 2005. Análisis histórico de los impactos naturales y antrópicos sobre los arrecifes coralinos del Parque Nacional Natural Corales del Rosario, Caribe colombiano. Tesis de Biólogo Marino. Universidad Jorge Tadeo Lozano. Santa Marta. Colombia. 103 p.

Recibido: junio 26 de 2008.

Aceptado para su publicación: febrero 24 de 2009.

ESCARABAJOS DEL GÉNERO *DICHOTOMIUS* HOPE 1838 (SCARABAEIDAE: SCARABAEINAE) EN LA AMAZONÍA COLOMBIANA¹

Por

Rodrigo Sarmiento-Garcés² & Germán Amat-García³

Resumen

Sarmiento-Garcés R. & G. Amat-García: Escarabajos del género *Dichotomius* Hope 1838 (Scarabaeidae: Scarabaeinae) en la Amazonía colombiana. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **33**(127): 285-296, 2009. ISSN 0370-3908.

Se dan a conocer las especies del género *Dichotomius* Hope de la Amazonía de Colombia, con inclusión de los subgéneros y “complejos de especies”, equivalentes a los subgéneros y a las secciones propuestas por Lüderwaldt (1929). Los caracteres se basan principalmente en las características de los cuernos, protuberancias de la cabeza, características pronotales, torácicas y elitrales. Se citan localidades colombianas y se comentan tendencias de distribución geográfica de las especies. Finalmente, se incluye una clave ilustrada para el reconocimiento de las especies.

Palabras clave: Coleoptera, Scarabaeidae, *Dichotomius*, Colombia, Amazonas.

Abstract

We present a study of the species of the genus *Dichotomius* Hope from the Colombian Amazon, including subgenera and “species-complexes” equivalent to the subgenera and sections proposed by Lüderwaldt (1929). The characters are based mainly on morphology of the horns, protuberances of the head, and features of the pronotum, thorax and elitrae. Localities in Colombia are cited with comments on geographic distribution of the species. Finally, an illustrated key is included for identification of the species.

Key words: Coleoptera, Scarabaeidae, *Dichotomius*, Colombia, Amazonas.

¹ Estudio enmarcado dentro del proyecto **ESCARABAJOS DE COLOMBIA** (Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia).

This study is part from the project **BEETLES OF COLOMBIA** (Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia).

² Grupo Insectos de Colombia, Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá-Colombia. Correo electrónico: rasarmientog@unal.edu.co

³ Grupo Insectos de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá-Colombia. Correo electrónico: gdamatg@unal.edu.co

Introducción

Dichotomius es un género de Scarabaeinae endémico en América, con aproximadamente 150 especies, en su mayoría suramericanas, sus especies son de actividad nocturna y alcanzan tallas medianas a grandes (9-27 mm) (Gill, 1991). El género comprende 4 subgéneros: *Dichotomius s. str.* Martínez, *Homocanthomoides* Lüederwaldt, *Luederwaldtinia* Martínez y *Selenocopris* Burmeister (Génier, 2000). Las especies de este género se caracterizan por presentar un cuerpo robusto, ovalado, ovalado-alargado, a veces recto o redondeado, con una coloración café, negro a azul o cobrizo; la antena presenta nueve artejos; el clípeo se observa dorsalmente muy desarrollado; la cabeza y el pronoto generalmente armados de cuernos, carinas o protuberancias; el tercer segmento del palpo labial es conspicuo; el escutelo no visible; élitros con ocho estrías; coxas anteriores cortas, cónicas y prominentes; mesocoxas no contiguas; las meso y metatibias se expanden gradualmente hacia su ápice, sin una carina transversa y evidente hacia el tercio o parte media apical; estas últimas cuentan con dos espolones; los tarsos tienen uñas en todas las patas; mesosternón ancho; abdomen con seis esternitos, de los cuales cinco de ellos no se estrechan considerablemente en su parte media (Kohlmann y Solís, 1997).

Ecológicamente, se ha calificado a las especies de *Dichotomius* como generalistas que ocupan bordes de bosque, con una alta capacidad de penetrar y salir del mismo (Amat, *et al.*, 1997), también presentan una excelente facultad dispersora y una gran preferencia por el excremento vacuno y equino (Amézquita, *et al.*, 1999). Existen pocas citas en la literatura biosistemática clásica que trata sobre el género (López-Guerrero, 2005); de los primeros trabajos se conocen, por ejemplo, los de Harold (1869), Bates (1886-1890), Felsche (1901, 1910), contribuyeron al conocimiento del grupo con la descripción de varias nuevas especies; posteriormente Lüederwaldt (1929, 1935) hizo una revisión completa del género. Pereira (1942a, 1942b, 1947, 1953) realizó una revisión detallada en algunas de las secciones propuestas dentro del grupo. Entre las contribuciones recientes merecen mencionarse las de Howden y Young (1981), Peck y Howden (1984), Kohlmann y Solís (1997), Génier (2000), Vaz de Mello, *et al.*, (2001), Kohlmann (2003) y Frolov y Scholtz (2003). En concordancia con estos estudios, el grupo requiere una urgente revisión taxonómica, pese a que el grupo ha sido parcialmente abordado por Montreuil (1998), quien realizó un estudio filogenético novedoso de los 27 géneros de Coprini y Dichotomini y propone una redefinición de los grupos monofiléticos Coprini y Ateuchini, transfiriendo el género *Dichotomius* a la tribu Coprini. Un aspecto que contribu-

ye a la problemática taxonómica del grupo es que a los machos y hembras de una misma entidad se les considere como especies distintas, lo que conduce a diagnósticos taxonómicos equívocos y a una sobreestimación en la riqueza de especies.

En Colombia se conocen actualmente unas 36 especies del género (Medina, *et al.*, 2001), pero es muy probable que la riqueza conocida se incremente en los próximos años (Pulido-Herrera, *et al.*, 2007). Vulcano y Pereira (1967) dieron a conocer 33 especies para toda la región amazónica suramericana, con claves para la delimitación de sus especies; de la Amazonía colombiana se conocen siete especies gracias a listados comentados o estudios locales, en los cuales también se dan a conocer las morfoespecies (Howden y Nealis, 1975; Pulido-Herrera, *et al.*, 2003). En este estudio se actualiza el conocimiento sobre el grupo, con distribución en la Amazonía colombiana, así como aspectos de su diagnosis taxonómica y se propone una clave ilustrada para el reconocimiento de subgéneros, “complejos-especie” y especies.

Materiales y Métodos

Área de estudio: la Amazonía colombiana, con un área de 300.092 Km², se localiza entre 4°05' latitud norte, 4°10' sur y entre 76°16' y 66°50' longitud oeste, comprende localidades de los departamentos del Guainía, Guaviare, Vaupés, Putumayo, Caquetá y Amazonas e incluye a la sierra de La Macarena. Es una región de importancia biogeográfica con una fisiografía ondulada, constituida geológicamente por rocas sedimentarias del Terciario y por afloramientos del escudo Guyanés (noreste). Las mayores elevaciones alcanzan los 800 m en la serranía de Chiribiquete, al occidente del departamento del Guaviare y los 2800 m en la serranía de La Macarena (Rangel, *et al.*, 1997).

Examen de material: se realizó mediante la revisión de aproximadamente 220 ejemplares depositados en la colección entomológica del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia (ICN-MHN), Bogotá D.C.

Resultados y discusión

La riqueza conocida de los *Dichotomius* en la Amazonía colombiana se compone de 11 especies, incluidas en dos subgéneros y seis secciones. *Dichotomius*, subgénero *sensu strictus*, es el de mayor riqueza, con siete especies, a diferencia del subgénero *Luederwaldtinia* que incluye solo a tres especies (Tabla 1). Como criterio de comparación, se conocen 11 especies para toda la Amazonía brasileña (Vaz de Mello, 1999; Andresen, 2002), de las cuales *D. boreus*,

D. lucasi, *D. mamillatus* y *D. ohausi* se comparten con la Amazonía colombiana; adicionalmente, sólo se conocen cinco especies en México (López-Guerrero, 2005), 10 en Costa Rica (Kholmann y Solís, 1997), siete en Panamá (Kholmann y Solís, 1997) y 10 en la región amazónica ecuatoriana (Cely, *et al.*, 2004).

Reseña de los taxones

Subgénero *Dichotomius* (Martínez, 1951)

Diagnosis. Cuerpo en general robusto, ovalado, elongado, raramente rectilíneo o poco redondeado; superficie dorsal glabra y ventral con abundante pubescencia. Cabeza, en general, con protuberancias, salientes y/o cuernos de distinta forma, tamaño y posición. Clípeo muy grande y redondeado, raramente triangular (Figuras 1a, 1b).

Las genas están bien diferenciadas por una estría bien marcada que alcanza la parte posterior de la cabeza; el margen anterior simple o con una pequeña indentación o emarginación. Antenas con nueve artejos. Clava con tres artejos prolongados, pubescentes en general pardos o anaranjados. Palpos labiales con tres artejos, los dos primeros alargados o el primero muy grande. Ojos ovalados y visibles en la parte superior. Pronoto redondeado o con protuberancias y/o salientes de diferentes formas y tamaños.

Especies del complejo *Boreus*

Cuerpo de tamaño mediano a grande (20-28 mm.), color negro brillante. Superficie dorsal glabra y ventral con pubescencia rojiza y abundante; cabeza redondeada, clípeo débilmente emarginado con fuertes arrugas transversas; ángulos posteriores de las genas fuertemente redondeados. Machos y hembras con dos protuberancias una detrás de la otra (Lüderwaldt, 1929)(Figura 1a). Protuberancia anterior ubicada en el clípeo, a manera de carina transversa, que usualmente presenta dos dienteillos, uno

a cada lado de la carina. La protuberancia posterior, situada en la base de los ojos, es trituberculada, siendo la central más grande que las laterales.

Protórax con un fuerte declive. A cada lado de la línea media se forma una concavidad cuya forma varía con la especie. Los machos y las hembras son muy parecidos, siendo estas últimas un poco más pequeñas que los machos.

Comentarios. Este grupo de especies corresponde a la sección *Boreus*, según Lüderwaldt (1929).

Dichotomius af. boreus (Olivier, 1789) Figuras 1a, 1b.

Copris boreus. Olivier, 1789-1790.

Pinotus boreus Lüderwaldt, 1929

Diagnosis (♂♂). Borde anterior de la cabeza redondeado, clípeo con fuertes rugosidades transversas. En la cabeza se presentan dos protuberancias una clipeal y una en la base de los ojos; la anterior es una carina transversa con o sin dientes laterales; la posterior es una giba trituberculada, siendo el tubérculo central más grande que los laterales.

Pronoto con un fuerte declive, consta de cuatro protuberancias; las centrales, una a cada lado de la línea media, son mucho más grandes y constan de tubérculos casi cuadrados con una pequeña saliente en la parte exterior; las laterales más pequeñas y dentiformes. En el medio de estas se forma una concavidad alargada verticalmente. Pronoto liso o finamente punteado. Élitros lisos y brillantes, estrías con puntuación. Parte media del metaesternon lisa y zonas laterales densamente pubescentes. Fósula del metaesternon apenas evidente. Placa subclipeal presente, triangular y sin elongación. Proceso subclipeal presente en forma de espina, aplanado lateralmente y trunco. El proceso y la placa subclipeal están conectados por una pequeña carina longitudinal.



Figuras 1a-b. Detalle cefálico, (a) y pronotal, (b) en *Dichotomius af. boreus* (Olivier, 1789). Escala= 5mm.

Material revisado. AMAZONAS: Leticia vía a Tarapacá Km 7, 120m, Sept 2002, Curso Sistemática Animal (1 ICN-MHN-045420). AMAZONAS: Leticia vía a Tarapacá Km 11, 90m, Sept 12 2001, H. Gasca (6 ejem ICN-MHN-CO-8524, 8525, 8526, 8527, 8529). GUAVIARE: San José del Guaviare, Ago 27 1999, J. Castro (10 ejem ICN-MHN-CO-6953, 6982, 6984, 7801, 7802, 7807, 7809, 8003, 8004, 8005). GUAVIARE: R. Nukak, C. Moyano N02°10'35"W71°10'58" Sta. Marta, 250m, Feb 1996, F. Escobar (ICN-MHN-CO-6118). GUAVIARE, Nukak, Cerro (1 ejem ICN-MHN-CO-6119). VAUPÉS, Caparú, Terraza, Nov 27 1995.

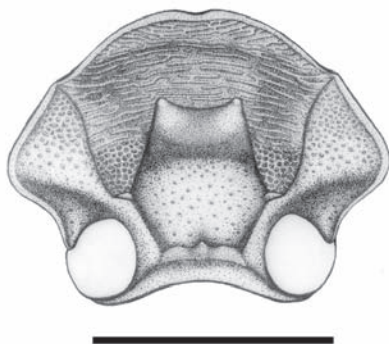
Distribución. Es una especie típica del Amazonas que puede dispersarse a regiones del piedemonte amazónico colombiano.

Dichotomius podalirius (Felsche, 1910) Figuras 2a, 2b

Pinotus podalirius. Felsche, 1910. *Pinotus podalirius*. Lüderwaldt, 1929

Diagnosis. Borde anterior de la cabeza redondeado, clipeo con fuertes rugosidades transversas. En la cabeza se presentan dos protuberancias una clipeal y una en la base de los ojos; la anterior es una carina transversa con o sin dientes laterales; la posterior es una giba trituberculada siendo el tubérculo central mas grande que los laterales.

Pronoto con un fuerte declive, consta de dos protuberancias una a cada lado de la línea media, en forma de dos tubérculos cónicos bien definidos; debajo de cada una de estos se encuentra una concavidad redonda poco profunda. Pronoto liso o finamente punteado. Élitros lisos y brillantes, estrías con puntuación. Parte media del metaesternon liso y zonas laterales densamente peludas. Fósula del metaesternon inconspicua o apenas evidente. Placa subclipeal presente, triangular y sin elongación. Proceso subclipeal presente en forma de espina, aplanado lateralmente y trunco. El proceso y la placa subclipeal pueden o no estar conectados por una pequeña carina longitudinal.



Figuras 2a-b. Detalle cefálico, (a) y pronotal, (b) en *Dichotomius podalirius* (Felsche 1910) Escala= 5mm.

Material revisado. Leticia vía a Tarapacá Km 11, 90m, Sep 12 2001- Oct 10 2001, H. Gasca (2 ejem ICN-MHN-CO-8545, 8548) GUAVIARE: San José del Guaviare, Puerto Ospina 200m, Sep 4 1999, J. Castro (1 ejem ICN-MHN-023221). VAUPÉS, Caparú Igapú, 100m, Dic 9 1995 (1 ejem ICN-MHN-CO-8224)

Distribución. Especie ampliamente distribuida en la Amazonía y Orinoquía colombiana, dispersándose en esta última región a través de los bosques de galería *podalirius* (Amézquita, *et al.*, 1999). Su rango de distribución altitudinal va desde los 0 a 300 m.

Especies del complejo *Protectus*

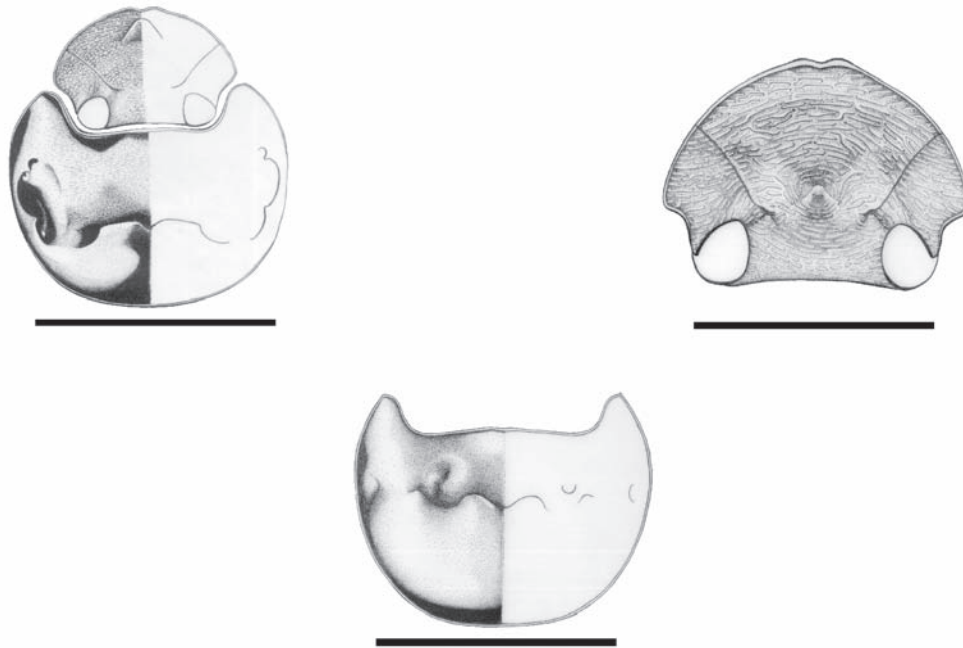
Cuerpo negro, con un brillo intenso, de tamaño mediano a grande. Borde anterior de la cabeza débilmente emarginado, puede presentar dos pequeños dientes. Clipeo con fuertes rugosidades transversas, cabeza con una protuberancia; en los machos es un cuerno clipeal aplanado anteroposterior, en las hembras es un cuerno cónico ubicado en el inicio de las genas. Pronoto con un fuerte declive, puede variar según el sexo y la especie en número y forma de protuberancias presentes. Espinas de las tibias traseras emarginadas. Placa subclipeal triangular y elongada, proceso subclipeal ausente.

Comentarios. Este grupo de especies corresponde a la sección *Mormon*, según Lüderwaldt (1929). El conjunto de caracteres diagnósticos se corresponde con el complejo de especies *Satanas* (Vaz de Mello, *com. pers.*), el cual está igualmente incluido en la sección *Mormon*. Las especies presentan marcado dimorfismo sexual.

Dichotomius ohausi (Lüderwaldt, 1929) Figuras 3a, 3b, 3c

Pinotus ohausi. Lüderwaldt, 1929

Diagnosis (♂♂). Borde anterior de la cabeza simple y con dos pequeños dientes, clipeo con fuertes rugosidades



Figuras 3a-c. (a). Detalle cefálico-pronotal, machos. (b) Detalle cefálico, hembras. (c) Detalle pronotal, hembras en *Dichotomius ohausi* (Lüderwaldt, 1929). Escala= 5mm.

transversas. Cabeza con un cuerno aplanado antero posterior, cercano al margen anterior. Pronoto con un fuerte declive, consta de 4 protuberancias; las centrales una a cada lado de la línea media, son mucho más grandes y truncadas, las laterales más pequeñas y dentiformes; en el medio de estas se forma una concavidad alargada verticalmente. Pronoto liso o finamente punteado. Élitros lisos y brillantes, estrías con puntuación. Parte media del metaesternon con unos pocos pelos dispersos y zonas laterales densamente peludas. Fósula del metaesternon apenas evidente. Placa subclipeal presente, triangular alargada en la parte apical. Proceso subclipeal ausente.

(♀ ♀). Borde anterior de la cabeza simple y con dos pequeños dientes, clípeo con fuertes rugosidades transversas. Cabeza con una protuberancia cónica, ubicada en el inicio de las genas. Pronoto con un fuerte declive, consta de dos protuberancias redondeadas, una a cada lado de la línea media, declive con dos concavidades ubicadas debajo de cada protuberancia. Pronoto liso o finamente punteado. Élitros lisos y brillantes, estrías con puntuación. Parte media del metaesternon con unos pocos pelos dispersos y zonas laterales con pubescencia densa. Fósula del metaesternon apenas evidente. Placa subclipeal presente, triangular elongada en la parte apical. Proceso subclipeal ausente.

Material revisado. AMAZONAS: Leticia Km 11 vía a Tarapacá, 100m, Curso Sistemática Animal, Abril 28 2002 (2

ejem ♂ ICN-MHN-023226,045411). AMAZONAS: Leticia km 11 vía a Tarapacá, 90m, H. Gasca, oct 10 2001 (1 ejem ♂ ICN-MHN-CO-8555). AMAZONAS: Leticia Km 7 vía a Tarapacá, Curso Sistemática Animal, abril 2002 (1 ejem ♀ ICN-MHN-036115). ECUADOR: Provincia Francisco de Orellana. Reserva Nacional Estación Yasuní, 300m, Dic 2 2004, F. Fernández (1 ejem ♂ ICN-MHN-023224).

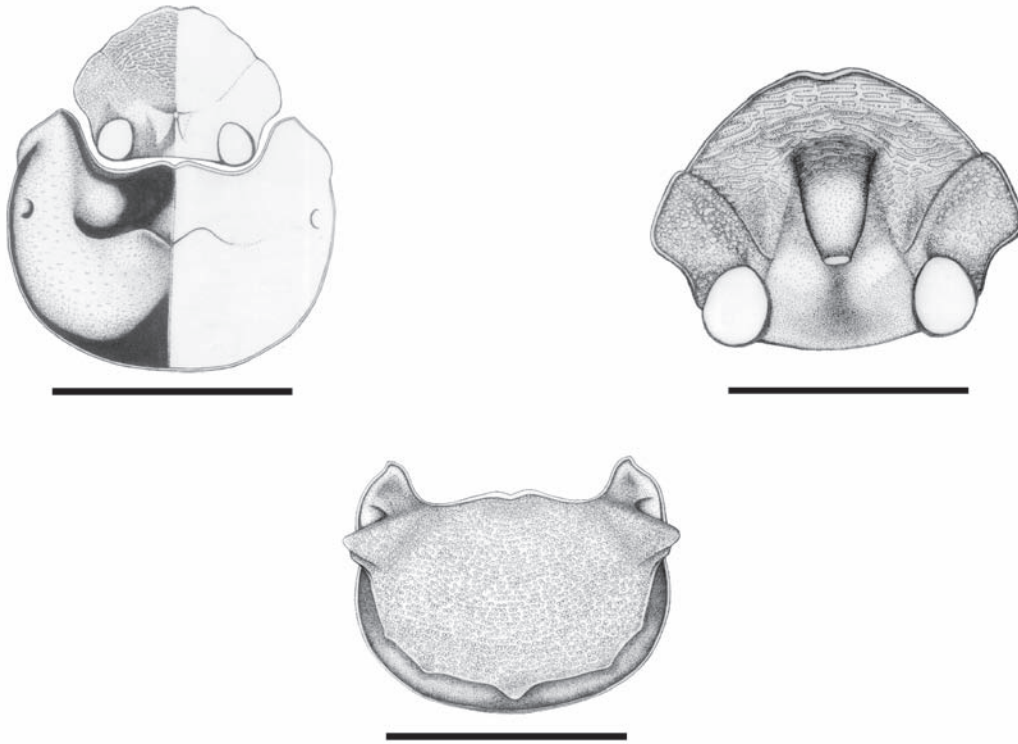
Distribución. Es una especie que se colecta con cierta frecuencia en la Amazonía colombiana; en la Amazonía ecuatoriana, de donde es la especie tipo, se distribuye en un rango altitudinal de los 700 a los 1100 m (Cely, *et al.*, 2004).

Dichotomius quinquelobatus (Felsche, 1910) Figuras 4a, 4b, 4c

Pinotus quinquelobatus. Felsche, 1910

Pinotus quinquelobatus. Lüderwaldt, 1929

Diagnosis (♂ ♂). Borde anterior de la cabeza simple y con dos pequeños dientes, clípeo con fuertes rugosidades transversas. Cabeza con un cuerno aplanado antero posterior, cercano al margen anterior. Pronoto con fuerte declive plano, que alcanza alrededor de $\frac{3}{4}$ del tamaño del mismo, consta de cinco protuberancias con forma de pequeños cuernos, ubicados a lo largo del margen posterior del declive, siendo el central y los extremos laterales un poco más gran-



Figuras 4a-c. (a) Detalle cefálico-pronotal, hembras (b) Detalle cefálico, machos (c) Detalle pronotal, machos en *Dichotomius quinquelobatus* (Felsche, 1910). Escala= 5mm.

des que los ubicados al lado del cuerno central. Pronoto liso o finamente punteado o con pequeñas estrías. Parte media del metaesterno con unos pocos pelos dispersos y zonas laterales densamente peludas. Fósula del metaesterno panda y ovalada. Placa subclipeal presente, triangular, elongada en la parte apical. Proceso subclipeal ausente.

(♀ ♀). Borde anterior de la cabeza simple y con dos pequeños dientes, clipeo con fuertes rugosidades transversas. Cabeza con una protuberancia cónica, ubicada en el inicio de las genas Pronoto con fuerte declive, que alcanza menos de $\frac{1}{2}$ del tamaño del mismo, presenta cuatro tubérculos dispuestos transversalmente, los dos centrales mas prominentes que los laterales. Anteriormente a los tubérculos y detrás de cada ojo se presenta una pequeña concavidad, que puede estar ausente en las hembras de menor desarrollo. Pronoto liso o finamente punteado. Parte media del metaesterno con poca pubescencia y zonas laterales pubescentes. Fósula del metaesterno superficial y ovalada. Placa subclipeal presente, triangular, elongada en la parte apical. Proceso subclipeal ausente.

Material revisado. CAQUETÁ, El Pato, vda. Chorreras, 1200m, J Castro, oct 15 1999 (1 ejem ♂ ICN-MHN-CO-5395).

CAQUETÁ, Guayabal, río Oso, 1120m, J Castro (2 ejem ♀ ICN-MHN-CO-5392, 5394). PUTUMAYO, Orito, Puniyal, vda. el Líbano, Cuenca Río Guamuez, N00°42'52.7"W77°05'49", 1050 m., nov 2003 (1 ejem ICN-MHN-045404).

Distribución. En Colombia es una especie que se puede encontrar en las tres cordilleras, con un rango altitudinal de los 1000 hasta los 2200m. Tiene preferencias en ambientes boscosos del piedemonte amazónico colombiano y ecuatoriano (Cely, *et al.*, 2004).

Dichotomius protectus (Harold, 1869) Figuras 5a, 5b

Pinotus protectus. Harold, 1869.

Pinotus protectus. Lüderwaldt, 1929

Diagnosis (♂ ♂). Borde anterior de la cabeza simple y con dos pequeños dientes, clipeo con fuertes rugosidades transversas. Cabeza con un cuerno aplanado antero posterior, cercano al margen anterior. Pronoto con fuerte declive plano, que alcanza alrededor de $\frac{3}{4}$ del tamaño del mismo, consta de dos protuberancias de igual tamaño con forma de pequeños cuernos triangulares, ubicados a lo largo del margen posterior del declive a cada lado de la



Figuras 5a-b. (a) Detalle cefálico-pronotal, machos. (b) Detalle cefálico-pronotal, hembras en *Dichotomius protectus* (Harold, 1869). Escala= 5mm.

línea media. Pronoto estriado. Parte media del metaesternon con unos pocos pelos dispersos y zonas laterales densamente peludas. Fósula del metaesternon panda y ovalada. Placa subclipeal presente, triangular, elongada en la parte apical. Proceso subclipeal ausente.

(♀ ♀). Borde anterior de la cabeza simple y con dos pequeñísimos dientes, clipeo con fuertes rugosidades transversas. Cabeza con una protuberancia cónica, ubicada en el inicio de las genas. Pronoto con fuerte declive, que alcanza alrededor de $\frac{1}{2}$ del tamaño del mismo, presenta cuatro tubérculos cónicos dispuestos transversalmente de igual tamaño. Anteriormente a los tubérculos y detrás de cada ojo se presenta una pequeña concavidad, muy pequeña o ausente en las hembras de menor desarrollo. Pronoto liso o finamente punteado. Parte media del metaesternon con unos pocos pelos dispersos y zonas laterales densamente peludas. Fósula del metaesternon superficial y ovalada. Placa subclipeal presente, triangular, elongada en la parte apical. Proceso subclipeal ausente.

Material revisado. PUTUMAYO, Orito, Puniyal. Vda. El Líbano, Cuenca río Guamuez, N00°42'52.7"W77°05'49", 1050 m, nov 2003 (1 ejem ICN-MHN-045403).

Distribución. Se distribuye a lo largo de la Cordillera Oriental hasta los 2500 m, alcanzando el Valle del Magdalena y el piedemonte orinocense y amazónico. En Ecuador presenta distribución en el piedemonte amazónico entre los 1300 y los 2000m (Cely, *et al.*, 2004).

Especies del complejo *Mamillatus*

Cabeza redondeada, con clipeo dentado, machos con cuernos cortos; pronoto con declive bajo, sin prominencias marcadas. Élitros puntuados, con intersticios lisos o

finamente puntuados. Las estrías de los élitros no desembocan en su base, sino en una fósula y ésta es poco vistosa (Lüderwaldt, 1929).

Comentarios. Este grupo de especies corresponde a la sección *Inhiatus*, según Lüderwaldt (1929).

Dichotomius mamillatus (Felsche, 1910) Figuras 6a, 6b

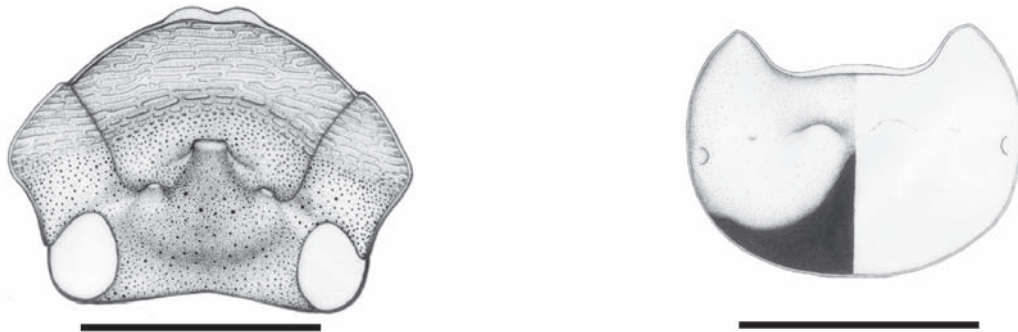
Pinotus mamillatus. Felsche, 1910.

Pinotus mamillatus. Lüderwaldt, 1929

Diagnosis (♂ ♂). Cabeza redondeada. Clipeo con dos pequeños dientes y con rugosidad transversa. Protuberancia en ambos sexos ubicada en el inicio de las genas. En los machos es un pequeño cuerno corto, grueso y romo. En las hembras es una giba transversa tetracúspide siendo las centrales un poco más grandes y ubicadas un poco más hacia la parte anterior. Pronoto liso, en ambos sexos con declive menor a $\frac{1}{2}$ de la totalidad del pronoto, con dos pequeñas protuberancias redondeadas. Parte media del metaesternon liso; zonas laterales con pelos dispersos; fósula del metaesternon superficial y redondeada u ovalada. Placa subclipeal presente, triangular y sin elongación. Proceso subclipeal presente cónico de ápice trunco; el proceso y la placa están conectados por una carina longitudinal.

Material revisado. AMAZONAS: Leticia km 11 vía a Tarapacá, 90m, H. Gasca, sep- oct 2001 (2 ejem ♂ ICN-MHN-CO 8551, 8552) AMAZONAS: Leticia Km 11 vía a Tarapacá, 90m, H. Gasca, ago 28 2001 (2 ejem ♀ ICN-MHN-25889, 25891). AMAZONAS: Leticia km 11 vía a Tarapacá, 90m, H. Gasca, oct 10 2001 (1 ejem ♀ ICN-MHN-CO-8540).

Distribución. Su rango de distribución incluye la Amazonía y la Orinoquía colombiana. En la Amazonía colombiana y ecua-



Figuras 6 a-b. Detalle cefálico, (a) y pronotal, (b) en *Dichotomius mamillatus* (Felsche, 1910). Escala= 5 mm.

toriana es una especie muy bien representada en donde alcanza áreas de piedemonte hasta los 1300 m.

Dichotomius robustus (Lüederwaldt, 1935)

Diagnosis (♂♂). Borde anterior de la cabeza simple clipeo con rugosidad transversa. Protuberancia ubicada entre el inicio de las genas y la base de los ojos con forma de cuerno aplanado anteroposterior. Pronoto liso con declive menor a $\frac{1}{2}$ de la totalidad del pronoto, con dos pequeñas protuberancias redondeadas. Parte media del metaesterno liso; zonas laterales pubescencia dispersa; fósula del metaesterno superficial y redondeada u ovalada. Placa subclipeal presente, triangular y sin elongación. Proceso subclipeal presente cónico de ápice trunco; el proceso y la placa están conectados por una carina longitudinal.

Material Revisado. GUAVIARE. San José del Guaviare, sep 99; col: J. Castro (1 ejem ICN-MHN-036116). META. San Juan de Arama, enero, 8-92; col: G. Amat, K. Camacho, 580 m. (1 ejem ICN-MHN-036117).

Especies del complejo *Semianeus*

Se distingue de las demás secciones del subgénero por carecer de declive y de protuberancias en el protórax en ambos sexos; cuando mucho, los machos bien desarrollados presentan una insignificante depresión en el centro del protórax. Las hembras de algunas especies tienen el clipeo más o menos triangular (Pereira, 1942).

Comentarios. Este grupo de especies corresponde a la sección *Semianeus*, según Lüederwaldt (1929).

Dichotomius worontzowi (Pereira, 1942) Figura 8

Pinotus worontzowi. Pereira, 1942

Diagnosis (♂♂). Borde anterior de la cabeza simple y con dos pequeñísimos dientes, clipeo con fuertes

rugosidades transversas. Cabeza con giba transversa bituberculada; cada tubérculo en el extremo lateral de la carina; la protuberancia esta ubicada al inicio de las genas. Pronoto liso, sin declive, cuando mucho una pequeña depresión en el centro del protórax, lo cual es típico en todas las especies del complejo *worontzowi*. Parte media del metaesterno sin ninguna vellosidad y zonas laterales densamente peludas. Fósula del metaesterno superficial y ovalada. Placa subclipeal presente, de forma acorazonada, sin elongación en la parte apical. Proceso subclipeal presente y cónico; la placa y el proceso están separados.

Material Revisado. AMAZONAS: Leticia km 11 vía a Tarapacá, 90m, H. Gasca, oct 10 2001 (1 ejem ICN-MHN-CO-8537).

Distribución. Aunque se considera una especie típicamente amazónica, se ha comprobado su presencia en los bosques de galería de las sabanas de la Orinoquia colombiana, compartiendo hábitats con *D. mamillatus* y *D. podalirius* (Amézquita, et al., 1999).

Subgénero *Luederwaldtina* (Martínez, 1951).

Clipeo en el medio del margen anterior, claramente bidentado, raras veces emarginado y excepcionalmente redondeado (*belus*, *tristis*, *agenor* ♀, *nisus* forma *garbei*, *taunayi* forma, *semisquamosus* forma). Protórax en la parte anterior con mas o menos declive o simplemente convexo, parte basal en el primer caso casi siempre mayor que el declive y siempre sin protuberancias evidentes, como lóbulos, dientes; el margen anterior cuando mucho proyectado hacia el frente en el centro, con forma de lóbulo. Armadura de la cabeza en ambos sexos detrás del clipeo (Lüederwaldt, 1929).

Lüederwaldt (1929) deja entrever el carácter provisional de este grupo por falta de series de estudio más completas. Se espera, por consiguiente, que una revisión actual pueda descifrar mucho mejor este subgénero propuesto.

Especies del complejo *Lucasi*

Cuerpo negro, raras veces pardo o con reflejos azules o de color cobre, talla entre entre 18mm y 19 mm. Protórax liso o con puntos finísimos, convexo o con un pequeño declive; giba de la cabeza ubicada en frente de los ojos. Estrias de los élitros siempre presentes; parte superior casi siempre brillante. Dimorfismo sexual poco conspicuo (Lüderwaldt, 1929). Este grupo necesita un examen más detallado por la falta de especímenes a disposición. Este grupo de especies realmente necesita una urgente revisión puesto que su diferenciación es aún muy incipiente.

Comentarios. Este grupo de especies corresponde a la sección *Inachus*, según Lüderwaldt (1929).

Dichotomius af. problematicus (Lüderwaldt, 1922).
Figura 7

Dichotomius problematicus. Lüderwaldt, 1922

Diagnosis (♂♂). Clípeo en el margen anterior con indentación obtusa, presentándose dos dientes muy conspicuos, cabeza con textura rugosa. Protuberancia en ambos sexos con forma de giba cónica ubicada en el inicio de las genas. Pronoto completamente convexo en los machos mas largos que en las hembras y presenta un pequeño declive. Parte media del metaesternon con pubescencia dispersa al igual que las zonas laterales; fósula del metaesternon inconspicua. Placa subclipeal presente y sin elongación. Proceso subclipeal ausente. Espuela terminal de las tibiae posteriores emarginadas.

Material Revisado. CAQUETÁ, Guayabal, río Oso, Sep 14 1999, J. Castro (2 ejem ICN-MHN-025515, 025112).

Distribución. Esta especie se distribuye en zonas bajas de la Amazonía colombiana. Su distribución se extiende a los ambientes boscosos del piedemonte ecuatoriano, teniendo como altitud límite los 1700m (Cely, *et al.*, 2004).

Dichotomius af. lucasi (Harold, 1869) Figura 9

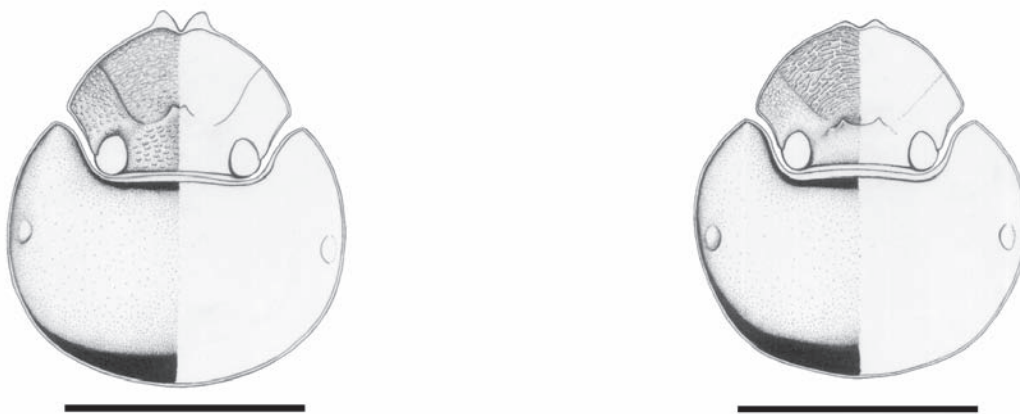
Dichotomius lucasi. Harold, 1869.

Pinotus lucasi. Lüderwaldt, 1929

Diagnosis (♂♂). Clípeo en el margen anterior con indentación aguda, presentándose dos dientes muy conspicuos y largos, Textura lisa y con pequeñas rugosidades transversas. Protuberancia en ambos sexos con forma de giba cónica ubicada en el inicio de las genas. Pronoto completamente convexo y finamente punteado. Parte media del metaesternon con puntos gruesos conspicuos, zonas laterales con pocos pelos dispersos o con puntuaciones iguales a la parte media; fósula del metaesternon inconspicua.

Material Revisado. AMAZONAS: Leticia km 10 vía a Tarapacá, 150m, estudiantes Sistemática Animal, mar 02 2002 (1 ejem ICN-MHN-CO-8671). AMAZONAS: Leticia km 11 vía a Tarapacá, 90m, H. Gasca, oct 24 2001 (1 ejem ICN-MHN-045410). AMAZONAS: Leticia km 11 vía a Tarapacá, 90m, H. Gasca, Ago 08 2001 (1 ejem ICN-MHN-CO-5389) AMAZONAS: Leticia km 11 vía a Tarapacá, 90m, H. Gasca, Oct 10 2001 (1 ejem ICN-MHN-8661) META, PNN. La Macarena, K. Camacho, G. Amat, sept 24, 92 (1 ejem ICN-MHN-25112).

Distribución. Es una especie típicamente amazónica, aunque puede llegar a la región de la Orinoquía colombiana, distribuyéndose con cierta frecuencia en los bosques



Figuras 7-8. (7) Detalle cefálico-pronotal, machos en *Dichotomius af. problematicus* (Lüderwaldt, 1922). (8) Detalle cefálico-pronotal, machos en *Dichotomius worontzowi* (Pereira, 1942). Escala= 5mm.

de galería y en ambientes de selva húmeda baja de regiones insulares continentales como La Macarena.

Especies del complejo *Batesi*

Protórax con puntos fuertemente marcados, convexo o con un pequeño declive, la protuberancia de la cabeza va desde un pequeño cuerno o giba aguda hasta un cuerno bien desarrollado. Estrías de los élitros siempre presentes. Lado superior generalmente opaco. Diferencias sexuales muy poco conspicuas. Mide entre 10mm y 14mm. (Lüederwaldt, 1929; Pereira, 1947).

Comentarios. Este grupo de especies corresponde a la sección *Batesi*, según Lüederwaldt (1929).

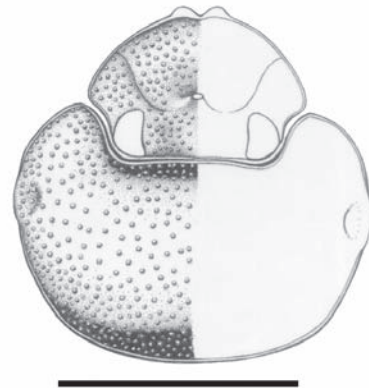
Dichotomius af. batesi. (Harold, 1869). Figura 10

Dichotomius batesi. Harold, 1869.

Pinotus batesii Lüederwaldt, 1929

Diagnosis (♂♂). Clípeo en el margen anterior con indentación aguda, presentándose dos dientes muy conspicuos y largos, textura lisa en el medio del clípeo y en los bordes puntos fuertemente marcados continuándose hasta las genas. Protuberancia en ambos sexos con forma de giba cónica ubicada en el inicio de las genas. Pronoto completamente convexo y fuertemente punteado con línea media presente. Parte media del metaesternon y zonas laterales con puntos gruesos y conspicuos; fósula del metaesternon inconspicua. Proceso subclipeal presente consistiendo en una espina cónica.

Material Revisado. AMAZONAS: Leticia km 11 vía a Tarapacá, 90m, H. Gasca, Ago 27 2001 (1 ejem ICN-MHN-025881). VAUPÉS, Caparú Igapú, 100m., F. Fernández, (1 ejem ICN-MHN-025882), nov 27 95. VAUPÉS, Caparú, Colinas, 100m., A. Lopera, (1 ejem ICN-MHN-025880), nov 29 95.



Figuras 9-10. (9) Detalle cefálico-pronotal, machos en *Dichotomius af. lucasi* (Harold, 1869). (10) Detalle cefálico-pronotal, machos en *Dichotomius af. batesi* (Harold, 1869). Escala= 5mm.

Distribución. Es una especie típicamente Amazónica, es decir ocupa ambientes boscosos de la selva húmeda tropical baja, con un límite altitudinal que va hasta los 100 m.

Clave para las especies de *Dichotomius* presentes en la región amazónica de Colombia

- 1 Margen anterior del clípeo casi redondeado y en algunos casos con una leve depresión en su parte central (Fig. 1a); pronoto con declive o cóncavo (Fig. 1a) (subgénero *Dichotomius*) 2
- 1' Margen anterior del clípeo con indentación central (Fig. 9); pronoto generalmente cóncavo (subgénero *Lüderwaldtinia*) 13
- 2 Pronoto con un fuerte declive y protuberancias conspicuas (Fig. 2b) 3
- 2' Pronoto cóncavo máximo con un pequeño declive; cabeza con giba transversa bidentada, dientes en zonas laterales de la giba (Fig. 8) *D. worontzowi*
- 3 Cabeza con protuberancias en dos posiciones: clipeal y en el inicio de las genas (Fig. 1a). Grupo con dimorfismo sexual muy marcado (sección *Boreus*) 4
- 3' Cabeza con protuberancia en una sola posición (Fig. 3b) 5
- 4 Pronoto con dos protuberancias cónicas del mismo tamaño, una a cada lado de la línea media, declive con dos concavidades redondeada (Fig. 2b) *D. podalirius*
- 4' Pronoto con cuatro protuberancias dos a cada lado de la línea media, las dos laterales son pequeñas y dentiformes, las dos centrales más conspicuas y casi cuadradas (Fig. 1b), declive con dos concavidades

- alargadas ubicada cada una el medio de la protuberancia lateral y central *D. af. boreus*
- 5 Pronoto con 2 protuberancias redondeadas (Fig. 6b) 6
- 5' Pronoto con protuberancias en forma de tuberculo, cuerno o diente 7
- 6 Cabeza con un cuerno aplanado anteroposterior *D. robustus* (♂ ♂)
- 6' Cabeza con tres protuberancias siendo la central más grande y conspicua. (Fig. 6a) *D. mamillatus*
- 7 Protuberancia clipeal en forma de lengua, con el ápice un poco redondeado (Fig. 4b) (♂ ♂) grupo *Satanas* 8
- 7' Protuberancia cónica ubicada al inicio de las genas (Fig. 3b) (♀ ♀ grupo *Satanas*) 9
- 8 Pronoto con declive completamente plano, alcanzando mas de ½ de la longitud total del pronoto (Fig. 5a) 11
- 8' Pronoto con dos tubérculos, declive casi vertical alcanzando menos de ½ de la longitud total del pronoto, con dos concavidades verticales alargadas (Fig. 3a). Talla pequeña *D. oahusi* (♂ ♂)
- 10 Pronoto con dos cuernos triangulares de igual tamaño, uno a cada lado de la línea media (Fig. 5b) *D. protectus* (♂ ♂)
- 10' Pronoto con dos cuernos separados ampliamente en su parte anterior. Margen posterior con tres protuberancias en forma de diente (Fig. 4a) *D. quinquelobatus*
- 11 Pronoto con una o dos protuberancias. Declive con una o dos concavidades 12
- 11' Pronoto con cuatro protuberancias cónicas de igual tamaño. Declive sin concavidades (Fig. 5a) *D. protectus* (♀ ♀)
- 12 Concavidades pronotales redondeadas y separadas entre si (Fig. 11) *D. oahusi* (♀ ♀)
- 12' Concavidades pronotales alargadas y fusionadas entre sí (Fig. 11) *D. quinquelobatus* (♀ ♀)
- 13 Pronoto cóncavo, el disco es completamente liso o presenta pequeñas puntuaciones, Cuerpo brillante (sección *Lucasi*) (Fig. 9) 14

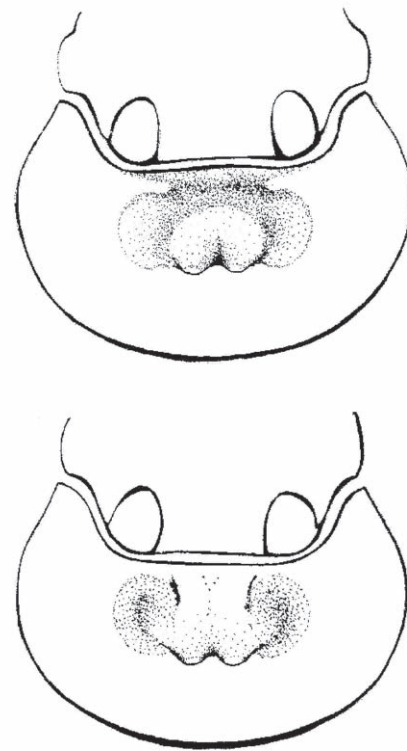


Figura 11. Concavidades anteriores pronotales de hembras en *Dichotomius quinquelobatus* (Felsche 1910), figura superior; concavidades anteriores pronotales de hembras en *Dichotomius oahusi* (Lüderwaldt, 1929), inferior.

- 13' Puntuaciones muy conspicuas sobre todo el pronoto y clipeo (Fig. 10). Cuerpo opaco *D. af. batesi*
- 14 Cabeza con una pequeña protuberancia redondeada (Fig. 9). Parte lateral del metaesternon sin pubescencia y con puntos redondeados muy conspicuos *D. af. lucasi*
- 14' Cabeza con un pequeño cuerno con ápice ampliamente truncado. Parte lateral del pronoto pubescente (Fig. 7) *D. af. problematicus*

Agradecimientos

Este estudio se hizo con el apoyo del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Agradecemos de manera especial a Carolina Medellín y José Avendaño, por su apoyo en la elaboración de las figuras y a Fernando Vaz de Mello, por sus valiosas sugerencias para la realización de este estudio. Finalmente, agradecemos a los evaluadores anónimos, que con sus observaciones mejoraron significativamente el contenido de la versión final del manuscrito.

Bibliografía

- Amat-García, G.; Lopera-Toro, A.; S. Amézquita-Melo.** 1997. Patrones de distribución de escarabajos coprófagos (Coleoptera: Scarabaeidae) en relicto del bosque altoandino, cordillera Oriental, Colombia. *Caldasia* **19**(1-2): 191-204.
- Amézquita, S.; Forsyth, A.; Lopera, A.; Camacho, A.** 1999. Comparación de la composición y riqueza de especies de escarabajos coprófagos (Coleoptera: Scarabaeidae) en remanentes de bosque de la Orinoquia colombiana. *Acta Zool. Mex (n.s.)* **75**: 113-126.
- Andresen, E.** 2002. Dung Beetles in a Central Amazonian rainforest and their ecological role as secondary seed dispersers. *Ecol. Ent.* **27**: 257-270.
- Bates, H. W.** 1886-1890. Pectinicornia and Lamellicornia. *Centr. Amer. Zool., Insect. Col.* **2**: 1-432.
- Cely, J.; Terneus, E.; Torres, J. ; Ortega, M.** 2004. Dung beetles (Coleoptera: Scarabaeinae) diversity in an altitudinal gradient in the Cutucú Range, Morona Santiago, Ecuadorian Amazon. *Lyonia* **7**(2): 37-52.
- Felsche, C.** 1901. Beschreibungen coprophagen Scarabaeiden. *Deutsche Entomologische Zeitschrift*: 135-160.
- Felsche, C.** 1910. Ber Coprophage Scarabaeiden. *Deutsche Entomologische Zeitschrift*: 339-352.
- Frolov, A. V.; C. H Scholtz.** 2003. Revision of the Afrotropical dung beetle genus *Sarophorus* Erichson (Coleoptera:Scarabaeidae) *Afric. Entomol.* **11**(2): 183-198.
- Génier, F.** 2000. *Dichotomius camarapensis* sp. nov., une nouvelle espèce bolivienne de scarabée brachyptère (Coleoptera: Scarabaeidae, Scarabaeinae). *Faberies* **25**(2-3): 25-31.
- Gill, B.** 1991. Dung beetles in tropical American forests. In: Hanski, I. & Y. Cambefort. (eds.). *Dung beetles Ecology*. Princeton University. p. 211-229.
- Harold, E. von.** 1869. Révision des espèces qui rentrent dans le genre *Pinotus* Erichs. *L. Abeille* **6**:123-144.
- Hope, F. W.** 1838. Observations on the Lamellicorns of Olivier *Ent. Mag.* **5**: 312-326.
- Howden, H. F.; Nealis, V. G.** 1975. Effects of clearing in a tropical rain forest on the composition of the *Coprophanaeus* Scarab Beetle Fauna (Coleoptera). *Biotropica* **7**(2): 77-83.
- Howden, H. F.;Young O. P.** 1981. Panamian *Scarabaeinae*: Taxonomy, distribution, and habits (Coleoptera, Coleoptera Scarabaeidae). *Contr. Am. Ent. Inst.* **18**: 1-204.
- Kohlmann, B.; Solis, A.** 1997. El género *Dichotomius* (Coleoptera: Scarabaeidae) en Costa Rica. *G. it. Ent.* **8**: 343-383.
- Kohlmann, B.** 2003. Tribu Coprini. En Atlas de los escarabajos de Mexico. Coleoptera. Vol. II. Familias de Scarabaeidae, Trogidae, Passalidae y Lucanidae. P. 45-58. Argania Aditio. Barcelona.
- López-Guerrero, I.** 2005. Los *Dichotomius* (Coleoptera: Scarabaeidae, Dichotomini) de la fauna de México. *Bol. de la Soc. Ent. Aragon.*, **36**: 125-209.
- Lüderwaldt, H.** 1929. As Especies brasileiras do Genero *Pinotus* (Coleoptera–Lamellicornidae–Coprini), com algumas considerações também sobre outras especies. *Rev. do Mus. Paul.* **16**: 603-775.
- Lüderwaldt, H.** 1935. Zur Kenntnis der Gattung *Pinotus* (Coleoptera: Scarabaeidae) *Rev. Ent.* **5**: 334-342.
- Martínez, A.** 1951. Notas coleopterológicas V. La invalidez del nombre genérico *Pinotus* Erichson y dos nuevas sinonimias (Col. Scarab). *Anal. Soc. Cient. Argentina* **152**: 138-142.
- Medina, C.; Lopera-Toro, A.; Vítolo, A.; B. Gill.** 2001. Escarabajos Coprófagos (Coleoptera: Scarabaeidae: Scarabaeinae) de Colombia. *Biota Colombiana.* **2**(2): 131-144.
- Montreuil, O.** 1998. Analyse Phylogenetique et paraphyletie des coprini et Dichotmini (Coleoptera: Scarabaeidae). *Scenário. Biogeographique. Annales de la Societé Entomologique (n.s.)* **34**(29): 135-148.
- Olivier, A. G.** 1789-1790. Entomologie, ou histoire naturelle des insectes, avec leurs caractères généraux et spécifiques, leur description, leur synonymie, ET leur figure enluminée. *Coléoptères.* 1-2. Paris.
- Peck S. B. y Howden H. F.** 1984. Response of dung beetle guild to different sizes of dung bait in panamian rain forest. *Biotropica* **16**: 235-238.
- Pereira, F.S.** 1942. *Pinotus* da secao Semiaeneus Arquivos do Museu Paranaense **2**: 35-60.
- Pereira, F.S.** 1942. *Pinotus* da secao Bitiensis Papéis Avulsos do departamento de Zoologia **2**(7): 117-131.
- Pereira, F.S.** 1947 *Pinotus* da secao Batesi Arquivos do Museu Paranaense **6**: 317-328
- Pereira, F.S.** 1953. *Dichotomius* da secao Speciosus Papéis Avulsos do Departamento de Zoologia **11**(18): 289-299.
- Pulido-Herrera, L. A.; Riveros, R., Gast, F. von Holdebrand, P.** 2003. Escarabajos coprófagos (Coleoptera:Scarabaeidae: Scarabaeinae) del Parque Nacional Natural “Serranía de Chiribiquete”, Caquetá, Colombia (Parte I). En: Onore, G.; Reyes-Castillo, P.; M. Zunino. (comp.). *Escarabeidos de Latinoamérica: estado del conocimiento.* m3m: Monografías Tercer Milenio, vol 3, SEA, Zaragoza. España. Pp. 51-58.
- Pulido-Herrera, L. A.; Medina, C.; Riveros, R.** 2007. Nuevos registros de escarabajos coprófagos (Scarabaeidae: Scarabaeinae) para la región andina de Colombia. Parte I. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **31**(119): 305-310.
- Quintero, I, Roslin, T.** 2005. Rapid recovery of dung beetles communities following habitat fragmentation in central Amazonia. *Ecology*, **86**: 3303-3311.
- Rangel, O.; Lowy, P.; Aguilar, M.** 1997. Colombia Diversidad Biótica II. Tipos de Vegetación en Colombia. Universidad Nacional de Colombia. 436 pp.
- Vaz-de-Mello, F.Z.** 1999. Scarabaeidae s. str. (Coleoptera: Scarabaeoidea) de un Fragmento de Floresta Amazonica no Estado do Acre, Brasil. 1. Taxocenose. *An. Soc. Entomol. Brasil* **28**(3): 447-453.
- Vaz de Mello, F.Z; J.N.C. Lousada; M. Gavino.** 2001. Nova especie de *Dichotomius* Hope, 1838 (Coleoptera, Scarabaeidae) do Espirito Santo, Brasil. *Rev. Brasil. de Ent.* **45**(2): 99-102.
- Vulcano, M. A.; F. Pereira.** 1967. Sinopse dos Passalidae e Scarabaeidae s. str. de região amazônica (Insecta: Coleoptera). *Actas do Simpósio sobre a Biota Amazônica*, **5**: 533-607.

Recibido: abril 27 de 2009

Aceptado para su publicación: junio 1 de 2009

PRIMER REGISTRO DE SITIO DORMIDERO PARA UNA COLONIA DEL LORITO CADILLERO, *BOLBORHYNCHUS FERRUGINEIFRONS*, Y ALGUNAS OBSERVACIONES ECOLÓGICAS Y COMPORTAMENTALES

Por

David A. Bejarano-Bonilla¹ & Annie M. Jiménez-Bonilla²

Resumen

Bejarano-Bonilla, D. A. & A. M. Jiménez-Bonilla: Primer registro de sitio dormidero para una colonia del Lorito cadillero, *Bolborhynchus ferrugineifrons*, y algunas observaciones ecológicas y comportamentales. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **33**(127): 297-302, 2009. ISSN 0370-3908.

En el municipio de Santa Isabel (Tolima-Colombia), se encontró el sitio dormidero para una colonia del Lorito cadillero, *Bolborhynchus ferrugineifrons*. El sitio, una pared rocosa, está ubicada a 3.450 m.s.n.m. La pared se caracteriza por ser lavas de composición andesítica-basáltica con estructura columnar (NqQn) de edad entre el Mioceno y el Pleistoceno. Se observaron dos tipos de nidos: unos en grietas y otros en cámaras entre una matriz de tierra y hojarasca. El número de individuos observados por nido fue entre 2 y 8 loros. Además, se registran seis nuevas especies de plantas que forrajea el lorito: *Baccharis tricuneata*, *Buddleja bullata*, *Hesperomeles ferruginea*, *Lachemilla orbiculata*, *Taraxacum officinale* y *Trifolium repens*. Este hallazgo y observaciones comenzarán a abrir el camino para investigar aspectos importantes para la conservación de este psitácido endémico y amenazado de Colombia.

Palabras claves: *Bolborhynchus ferrugineifrons*, comportamiento, dormideros, ecología, forrajeo, Tolima.

Abstract

In the municipality of Santa Isabel (Tolima-Colombia), the roosting site for a colony of Rufous-fronted Parakeet, *Bolborhynchus ferrugineifrons*, was found. The place, a rocky wall, is located at

¹ Research Postgraduate Student, University of Plymouth. Correo electrónico: david.bejarano-bonilla@plymouth.ac.uk

² Biologist. Correo electrónico: bio_anniejimenez@hotmail.com

3,450 m.a.s.l. The rocky wall is characterized by being of andesitic-basaltic lava with columnar structure (NqQn) dating between the Miocene and Pleistocene periods. Two nest types were recorded: one in crevices and the other in chambers made of a mix of soil and dead leaves. The individuals by nest were between 2-8 parakeets. Furthermore, six (6) new foraging species used by the parakeets were recorded: *Baccharis tricuneata*, *Buddleja bullata*, *Hesperomeles ferruginea*, *Lachemilla orbiculata*, *Taraxacum officinale* and *Trifolium repens*. This discovery and subsequent observations will pave the way to new research for the conservation of this endemic and endangered parakeet from Colombia.

Key words: Behavior, *Bolborhynchus ferrugineifrons*, ecology, foraging, roosting site, Tolima.

Introducción

El Lorito cadillero, *Bolborhynchus ferrugineifrons* Lawrence 1880 (Figura 1) es un especie endémica (Hilty & Brown, 1986; Stiles, 1998), rara (Kattan, 1992; López-Lanus *et al.*, 2000) y vulnerable (IUCN, 2008), que habita la parte alta de los Andes colombianos. Se encuentra entre las prioridades de conservación para las aves de Colombia (Renjifo *et al.*, 2000; Rengifo *et al.*, 2002; Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2006). Se conocen 9 especímenes colectados en diferentes museos: BioMap (2006) 8 individuos y un individuo del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia identificado con el número 36866. Se ha registrado entre los departamentos de Caldas, Cauca, Quindío, Risaralda, Tolima y Valle del Cauca (Hilty & Brown, 1986; Rengifo *et al.*, 2002; Verhelst *et al.*, 2002; Bejarano-Bonilla *et al.*, 2005; Espinosa, 2006). La población de este lorito es de muy baja densidad, se estima entre unos 1000 y 2000 individuos (Collar *et al.*, 1992; Jupiner & Parr, 1998), considerándose común en algunas zonas del complejo volcánico Ruiz-Tolima, en el Parque Nacional Natural Los Nevados (Rengifo *et al.*, 2002).

Dentro de la ecología de *B. ferrugineifrons*, se ha observado la preferencia por habitar la zona ecotonal entre el bosque Altoandino y el páramo (Ridgely, 1981; Graves & Giraldo, 1987; Verhelst *et al.*, 2002), y, en donde los cambios del paisaje por actividades antrópicas (cultivos de papa y potreros) son evidentes. El Lorito cadillero se ha observado alimentándose de *Anthoxanthum odoratum*, *Acaena elongata*, *Pernettya spp*, *Azolla filiculoides*, *Gynoxis tolimensis*, *Vallea stipularis*, *Rumex acetosella*, *Myrsine sp* (Verhelst *et al.*, 2002), *Bidens pilosa*, *Miconia salicifolia*, *Espeletia hartwegiana*, *Hypericum lanciolides*, *Polylepis sericea*, *Baccharis sp*, *Diplostephium sp*, *Hesperomeles sp* y *Buddleja sp* (Espinosa, 2006).

Según Rengifo *et al.* (2002), por conversaciones personales con algunos investigadores se ha sugerido las paredes rocosas como sitios de anidamiento para el Lorito cadillero, como sucede con otras especies de loros de la



Figura 1. Pareja de Loritos cadilleros, *Bolborhynchus ferrugineifrons* Lawrence 1880. (Foto: David A. Bejarano-Bonilla).

parte alta de los Andes. Sin embargo, hasta la fecha no se han descrito los nidos de este loro.

Metodología

Entre los meses de enero y febrero de 2008, temporada seca, se hicieron recorridos en el Parque Nacional Natural Los Nevados y su zona amortiguadora en búsqueda de poblaciones de *B. ferrugineifrons*. Se escogió el PNN Los

Nevados por ser uno de los lugares en donde existen más registros de esta especie y en donde se considera común (Graves & Giraldo, 1987; Rengifo *et al.*, 2002; Verhelst *et al.*, 2002; Espinosa, 2006). Los recorridos se hicieron por caminos preestablecidos. Durante los recorridos se registró la presencia del lorito, se cuantificaron bandadas, se hicieron observaciones ecológicas y comportamentales generales y, se tomaron muestras de las especies forrajeadas; las cuales fueron determinadas taxonómicamente en el Herbario TOLI de la Universidad del Tolima.

Resultados

Se recorrieron 228 km aproximadamente entre los 3000-4300 m.s.n.m. Se observaron 395 individuos en 30 bandadas, con un promedio de 13 ind/bandada, además se

escucharon 5 bandadas las cuales no se pudieron divisar por la poca visibilidad del momento. Los sitios en donde se observó mayor número de bandadas fueron las veredas Totarito (Santa Isabel-Tolima) y El Bosque (Pereira-Risaralda).

Sitio dormidero: La pared rocosa en donde se encontraron los nidos está ubicada al costado Sur de la Vereda Totarito en el municipio de Santa Isabel (Tolima), zona amortiguadora del PNN Los Nevados, a 3.450 m.s.n.m. con coordenadas geográficas 4° 44' N 75° 19' W (Figura 2). La pared tiene 1,5 km de largo y 110 m en su punto más alto (Figura 3). Se trata de una de una pared caracterizada por ser lavas de composición andesítica-basáltica con estructura columnar (NqQn) de edad entre el Mioceno-Pleistoceno (A. Núñez com pers.; Ingeominas, 1998). La pared presenta algunos parches pe-

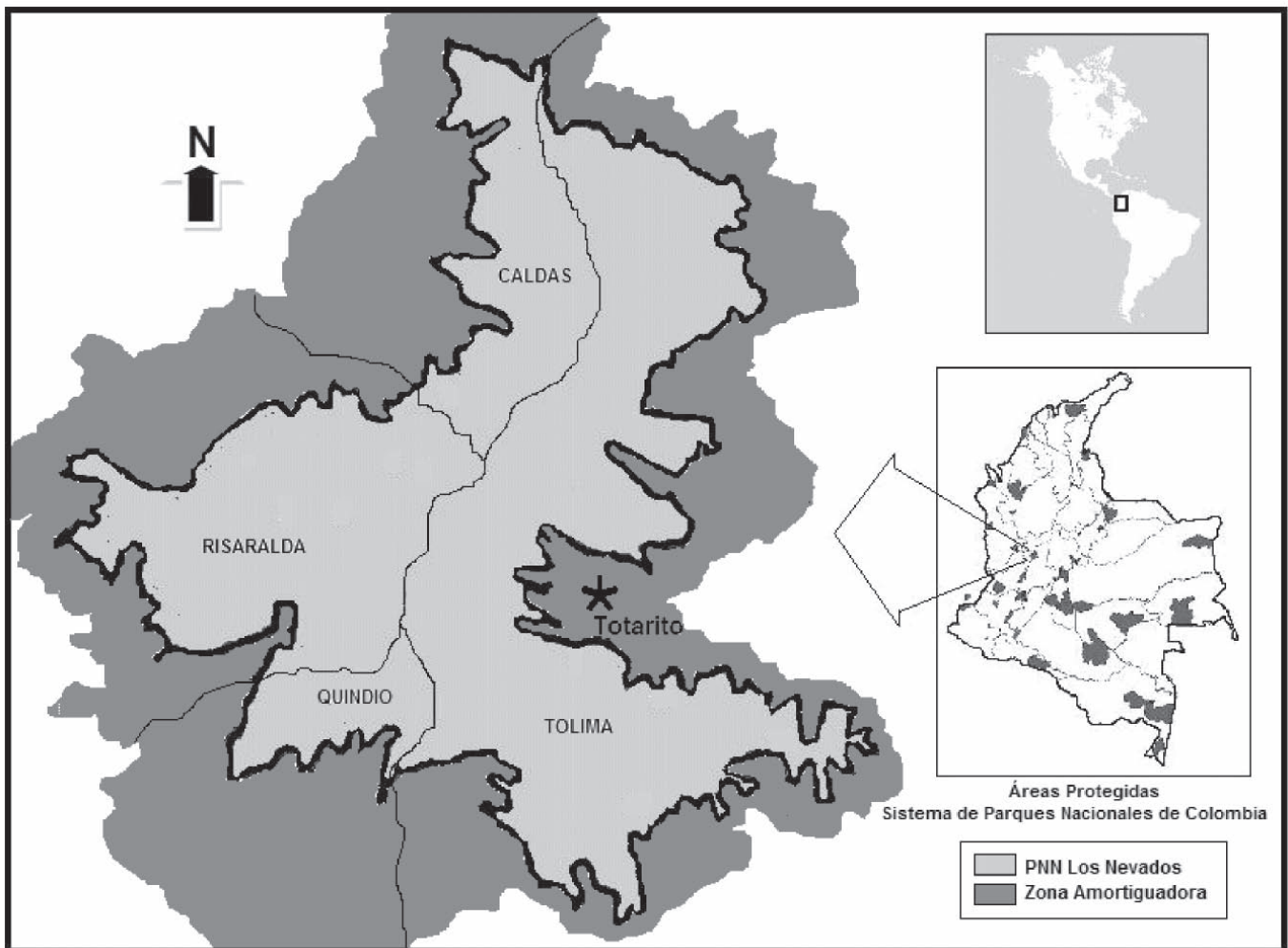


Figura 2. Mapa del sitio en donde se encontró la pared dormidero para una colonia del Lorito cadillero, *Bolborhynchus ferrugineifrons*, en la Vereda Totarito (Tolima-Colombia).

queños de vegetación herbácea y arbustos, sin embargo, se podría considerar limpia; también, tiene grietas muy definidas verticales de anchos diferentes, repisas, extraplomos y algunos bloques sueltos.

Características de los dormideros: Se observaron dos tipos de dormideros. Unos que se encuentran ubicados en grietas verticales tapizadas por tierra acumulada; estas grietas tienen un ancho entre 8-15 cm cubiertas generalmente por lianas secas. Los otros nidos, son cámaras que hacen entre una matriz de tierra y hojarasca que se acumula en pequeñas repisas, donde crece alguna vegetación herbácea (*Senecio formosus*, *Fuchsia vulcanica*, *Calceolaria tripartita*, entre otras); poseen de una a tres estradas circulares con un diámetro entre 7-10 cm. La altura en donde se encontraron los dormideros en la pared es entre 30-70 m. Los dormideros están distribuidos a lo largo de la pared, sin evidenciarse un sector preferencial, pero si, evitando los sitios en donde hay escurrimientos de agua.

Comportamiento en los dormideros: Entre las 17:30-18:15 horas, bandadas de *B. ferrugineifrons* llegan a dormir a la pared rocosa. En cada nido se observó ingresar entre 2-8 individuos. Entre el periodo de arribo de los loritos a la pared y el silencio total; los loritos están parlotando y, entrando y saliendo constantemente, un comportamiento que se podría describir como de “acomodación”. También, se observó que no siempre tienen los mismos sitios de dormidero, en ocasiones algunos sitios observados no fueron ocupados, sugiriendo que cada bandada puede tener más de un lugar dormidero en la pared. Entre las 06:00-06:15 horas, los loritos empiezan a salir de sus nidos. Inicialmente se perchan en vegetación adyacente a la salida de los nidos y comienzan un periodo que se podría describir como de “estiramiento y calentamiento”, en donde ellos estiran sus extremidades, posiblemente, para entrar en calor. Simultáneamente están en un continuo parloteo, hasta que parten de la pared con rumbos diferentes.

Especies forrajeadas: Durante los recorridos se observó a *B. ferrugineifrons* forrajear *Acaena elongata* L. Rosaceae, *Anthoxanthum odoratum* L. Poaceae, *Buddleja bullata* Kunth Scrophulariaceae, *Baccharis tricuneata* (L.f.) Pers. var. *paramorum* Cuatrec. Asteraceae, *Espeletia hartwegiana* Sch. Bip. subsp. *centroandina* Cuatrec. Asteraceae, *Hesperomeles ferruginea* (Pers.) Benth. Rosaceae, *Lachemilla orbiculata* (Ruiz & Pav.) Rydb. Rosaceae, *Miconia salicifolia* (Bonpl. ex Naudin) Naudin Melastomataceae, *Polylepis sericea* Wedd. Rosaceae, *Rumex acetosella* L. Polygonaceae, *Taraxacum officinale* Weber ex F.H. Wigg. Asteraceae, *Trifolium repens* L. Fabaceae y *Vallea stipularis* L.f. Elaeocarpaceae.

Comentarios

Algunos especies de psitácidos que habitan los Andes colombianos anidan y dormitan en escarpados rocosos: *Aratinga wagleri* y *Bolborhynchus lineola* (Hilty & Brown, 1986), igualmente, Hilty & Brown (1986) anotan que J. Hernández observó al Lorito cadillero en escarpados en el Nevado del Ruiz. Sin embargo, el hallazgo concreto de éste sitio dormidero para una colonia de aproximadamente 150 individuos en la Vereda Totarito es algo novedoso, importante y convierten el sitio como un escenario ideal para comenzar a estudiar comportamientos reproductivos de *B. ferrugineifrons*, desconocidos hasta el día de hoy (Verhelst J. C. y Espinosa R. com. pers.) y sugeridos dentro de las acciones para la conservación de ésta especie (Rengifo *et al.*, 2000; Rengifo *et al.*, 2002).

Si bien, algunos campesinos de la parte alta del municipio de Anzoátegui (Tolima) nos hicieron comentarios de haber visto a *B. ferrugineifrons* anidando y durmiendo en viviendas humanas abandonadas y, en huecos de árboles secos; en inspecciones realizadas en los sitios sugeridos no se encontraron evidencias de ese hecho; se considera necesario hacer más observaciones y búsquedas para corroborar ese comportamiento.



Figura 3. Panorámica de la pared dormidero de una colonia de aproximadamente 150 individuos del Lorito cadillero, *Bolborhynchus ferrugineifrons*, en el municipio de Santa Isabel (Tolima-Colombia); al fondo el Nevado del Tolima (Foto: David A. Bejarano-Bonilla).

Uno de los tipos de dormidero observados para *B. ferrugineifrons* es muy similar a los nidos hechos por *Cinclodes excelsior* y *Notiochelidon murina*, como lo afirma **Graves & Arango** (1988), sin embargo, los nidos de los loritos están hechos en una matriz de tierra y hojarasca seca, y no en tierra solamente, como los hacen las especies mencionadas.

Teniendo en cuenta las condiciones climáticas del sitio en donde se encontraron los dormideros, particularmente las bajas temperaturas en horas de la noche; consideramos que el comportamiento que hemos denominado “estramiento y calentamiento” realizado por *B. ferrugineifrons* a primeras horas de la mañana antes de partir de la pared; podría ser debido a un estado de “torpor” en que entran los individuos mientras duermen (**M. Bernal con. pers.**), ese mismo comportamiento fisiológico lo han analizado **Heller** (1989) y **French** (1993) para algunas especies de los ordenes Procellariiformes, Columbiformes, Coliiformes, Caprimulgiformes, Apodiformes y Trochiliformes, en otras latitudes. También, hay que anotar, que la pared tiene una orientación al Este, en donde los primeros rayos del sol le pegan directamente; ubicación que puede ser preferida por los loritos para la instalación de sus nidos, como sucede con algunos troquílidos andinos (**K. Schutze con. pers.**).

El promedio de individuos observados por bandadas coincide con lo registrado por (**Graves & Giraldo**, 1987) y (**Espinosa**, 2006); y el estimativo calculado de 1,7 ind/km es un poco superior al reportado por (**Rengifo et al.**, 2002), pudiendo sugerir que la población está aumentando; sin embargo, se sugiere aplicar metodologías más específicas para este fin.

En las observaciones de forrajeo se evidenció el consumo de 6 nuevas especies: *B. bullata*, *B. tricuneata*, *H. ferruginea*, *L. orbiculata*, *T. officinale* y *T. repens*. Estas nuevas especies que *B. ferrugineifrons* está forrajeando nos podrían estar demostrando como ésta especie está siendo “flexible” y “adaptativa” a los cambios antrópicos que se le está dando al uso de la tierra en el páramo. Habría que investigar más acerca de la relación del Lorito cadillero con el cambio del uso de la tierra, además, observar la fenología de las especies forrajeadas para evaluar la periodicidad e ítems que son consumidos por los loritos. Las familias vegetales con mayor número de especies forrajeadas fueron la Asteraceae y Rosaceae. Por otro lado, quizá la especie que **Espinosa** (2006) considera como *B. pilosa* se trate de *T. officinale*, ya que *B. pilosa* tiene una distribución altitudinal más baja (**Rangel**, 2000; **Lastra & Ponce de León**, 2001) y en nuestros recorridos no se observó ésta especie. También, consideramos que habría que comparar si *H. ferruginea*, *B. tricuneata* y *B. bullata*, re-

gistradas en nuestras observaciones son las mismas que **Verhelst et al.** (2002) y **Espinosa** (2006) reportan como *Hesperomeles sp*, *Baccharis sp* y *Buddleja sp*, respectivamente. De igual manera, la especie que **Verhelst et al.** (2002) y **Espinosa** (2006) denominan como “Lengua de vaca” corresponde al nombre vernáculo de *Rumex crispus* **Bernal et al.** (2006); y, *B. ferrugineifrons* consume *R. acetosella* que según los campesinos del PNN Los Nevados es conocida como “Envidia” o “Sangre toro”; **Bernal et al.** (2006) le registran otros nombres comunes como “Acedera”, “Lengüilla”, “Lamparilla”, entre otros.

Dentro de los recorridos no se evidenció la tenencia de *B. ferrugineifrons* como mascota, como lo han reportado otros investigadores (**Graves & Giraldo**, 1987; **Verhelst et al.**, 2002), sin embargo, hubo dos comentarios de campesinos que llamaron la atención: Uno, en la década de los 80s, en donde narran la forma como un padre le enseñaba a sus hijos a capturar los loritos con “hilachas de estopa” (hilos de costales sintéticos) o lana de ovejas. Y un segundo comentario, en el que una señora de la vereda Hoyo Frío (Anzoátegui-Tolima) le servía arroz a una bandada de loritos para poderlos ver en el jardín de la casa, esto ocurrió a finales de los años 90s; según **Wilson** (1984), este tipo de comportamientos por parte de los humanos es considerado como “biofilia” (inclinación innata de los humanos por los seres y procesos vivientes). También, llamó la atención la forma como los campesinos perciben al Lorito cadillero como un animal carismático y que no inspira capturarlo, porque les parece “bonito verlos en la finca”.

Consideramos que el hallazgo de éste sitio dormidero para una colonia del Lorito cadillero y, las observaciones ecológicas y comportamentales realizadas; abren y allanan el camino para investigar acerca de aspectos ecológicos, reproductivos, comportamentales y fisiológicos importantes para la conservación de *B. ferrugineifrons*: especie endémica, rara, amenazada y carismática de los páramos colombianos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Andrés Galindo por su acompañamiento y apoyo durante los recorridos. A Efraín Salinas y señora (Vereda El Bosque); Hernando Chica (finca África); Liliana Casas, Arnulfo Casas y, Fabio Cardona y señora (Vereda Totarito); Edilma Castellanos (Vereda Alto Bonito); Humberto Cañón (Finca El Termal); Duvan Ibagué, señora y hermanos (Finca El Vergel) y Miguel Roa y señora (Finca La Selva) por su hospitalidad y atención. A funcionarios del PNN Los Nevados por su colaboración e información. A Paul Ramsay, Steve Votier, Adolfo Vallejo, Manuel Bernal, Juan Carlos Verhelst, Alberto Núñez y Klaus

Schutze por sus comentarios y sugerencias. A Deisy Pava y Héctor Esquivel, curadores del Herbario TOLI, por sus asesorías en la determinación de especies. A la Unidad de Parques Nacionales Naturales, por el permiso de investigación científica. A Idea Wild, Birders' Exchange, Holly Hill Trust, CORTOLIMA, Siegfried Schuster, y la Corporación para la Conservación, Investigación y Desarrollo de los Ecosistemas, GEOBIOTA; por su apoyo.

Referencias

- Bejarano-Bonilla, D. A., J. F. A. García, A. M. González, J. Machado, G. Oyuela & A. Yate.** 2005. Informe final del estudio preliminar de fauna y flora de la Reserva Natural Ibanasca. Documento técnico, Cortolima. 170p.
- Bernal, R., G. Galeano, Z. Cordero, P. Cruz, M. Gutiérrez, A. Rodríguez & H. Sarmiento.** 2006. Diccionario de nombres comunes de las plantas de Colombia. Versión en línea. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. <http://www.biovirtual.unal.edu.co/diccionario/> (Fecha de acceso: 30 de Abril 2008).
- BioMap,** 2006. Participantes de la Alianza Biomap. 2006. Base de Datos Darwin: Proyecto BioMap base de datos de distribución de la avifauna Colombiana. <http://www.biomap.net>. (Fecha de acceso: 25 de Junio de 2008).
- Collar, N. J., L.P. Gonzaga, N. Krabbe, A. Madroño, L. G. Naranjo, T.A. Parker III & D. Wege.** 1992. Threatened birds of the Americas: The IUCN/ICBP Red Data Book. International Council for Bird Preservation. Cambridge, U.K.
- Espinosa, R.** 2006. Ecología del lorito cadillero *Bolborhynchus ferrugineifrons* en el Parque Nacional Natural Los Nevados y zonas aledañas. Tesis de pregrado. Universidad de Caldas, Colombia.
- French A., R.** 1993. *Hibernation in birds: comparison with mammals*, p. 43-53. In C. Carey, G. L. Florant, B. A. Wunder, and B. Horwitz [eds.], *Life in the cold: ecological, physiological and molecular mechanisms*. Westview Press, Boulder, CO.
- Graves, G. R & J. A. Giraldo** 1987. Population status of the Rufous-fronted parakeet (*Bolborhynchus ferrugineifrons*), a Colombian endemic. *LeGerfaut* **77**:89-92.
- Graves, G. R & G. Arango.** 1988. Nest-site selection, nest and eggs of the Stout-Billed Cinclodes (*Cinclodes excelsior*), a high Andes furnariid. *The Condor*: **90**:251-253.
- Heller, H. C.** 1989. Sleep, hypometabolism, and torpor in birds, p. 231-245. In C. Beth and R. E. Reinertsen [eds.], *Physiology of cold adaptation in birds*. Plenum Press, New York.
- Hilty, S. L. & W. L. Brown.** 1986. *A guide to the birds of Colombia*. Princeton University Press. New Jersey, USA.
- Ingeominas.** 1998. Plancha 225 Nevado del Ruiz. Escala 1:100.000.
- IUCN.** 2008. The IUCN Red List of threatened species. <http://www.iucnredlist.org>. (Fecha de acceso: Diciembre 30 de 2008).
- Jupiner, T. & M. Parr.** 1998. *Parrots. A guide to parrots of the world*. Yale University Press. New Haven and London. UK.
- Kattan, G.** 1992. Rarity and vulnerability: The birds of the cordillera Central of Colombia. *Conservation Biology* **6**:64-70.
- Lastra, H. A. & H. Ponce De León.** 2001. *Bidens pilosa* Linné. *Rev. Cubana Plant Med.* **1**:28-33.
- López-Lanus, B., Salaman P.W., Cowley T.P., Arango S. & Rengifo L.M.** 2000. The threatened birds of the río Toche, Cordillera Central, Colombia. *Cotinga* **14**:17-23.
- Parques Nacionales Naturales de Colombia.** 2006. Plan Básico de Manejo 2006– 2010 Parque Nacional Natural los Nevados. Documento técnico. Dirección Territorial Noroccidente, Medellín. 205 p.
- Rangel, J. O.** 2000. *Colombia Diversidad Biótica III. La región de vida paramuna*. Universidad Nacional de Colombia. Editorial Unibiblos. Bogotá, Colombia.
- Renjifo, L. M., A. M. Franco, H. Álvarez-López, M. Álvarez, R. Borja, J. E. Botero, S. Córdoba, S. De La Zerda, G. Didier, F. Estela, J. V. Rodríguez-Mahecha, C. Samper & W. Webber.** 2000. Estrategia Nacional para la Conservación de las Aves de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá D.C., Colombia.
- Renjifo, L. M., A. M. Franco-Maya, J. D. Amaya-Espinel, G. H. Kattan & B. López-Lanus (eds.).** 2002. Libro Rojo de las aves de Colombia. Serie Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y Ministerio del medio Ambiente. Bogotá. Colombia.
- Ridgely, R. S.** 1981. The current distribution and status of mainland neotropical parrots. Páginas 233-384 In: R. F. Pasquier, (ed). *Conservation of New World parrots*. Smithsonian Institution Press for the International Council for Bird Preservation (Tech. Pub. 1). Washington D. C. USA.
- Stiles, F. G.** 1998. Especies de aves endémicas y casi-endémicas de Colombia. In: Chaves, M. E. & Arango, N. (eds.) Informe Nacional sobre el estado de la biodiversidad 1998-Colombia. Bogotá. Instituto Alexander von Humboldt, PNUMA, Ministerio de medio Ambiente.
- Verhelst, J. C., A. M. Pfeifer, O. Orrego & J. E. Botero.** 2002. Observaciones sobre la ecología del Periquito Frentirrufo *Bolborhynchus ferrugineifrons* en las zonas cercanas a la Laguna del Otún. *Cotinga* **18**:66-70.
- Wilson, E. O.** 1984. *Biophilia*. Harvard University Press, Cambridge, Mass., USA. In: Drews C. editor. 1999. *Rescate de fauna en el Neotrópico*. EUNA. Heredia, C. R. 526p.

Recibido: julio 31 de 2008.

Aceptado para su publicación: febrero 24 de 2009.