

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

LA ACADEMIA ES ORGANO CONSULTIVO DEL GOBIERNO NACIONAL

VOLUMEN XXIII

DICIEMBRE DE 1999

NUMERO 89

DIRECTOR DE LA REVISTA: SANTIAGO DIAZ-PIEDRAHITA



CONTENIDO - CONTENTS

	Pág.		Pág.
Biología (Biology)			
Integrated pest management and Entomopathogenic fungal Biotechnology in the Latin Americas: II. Key Research and Development Prerequisites. (Manejo integrado de plagas y biotecnología de hongos entomopatógenos en América Latina. II. Clave de la investigación y requisitos desarrollo). <i>George Khachatourians & Edison Valencia</i>	489	(All the roads taken by Paul Erdős). <i>Rodrigo de Castro & Jerrold W. Grossman</i>	563
Ciencias de la Tierra (Earth Sciences)		Matemáticas (Mathematics)	
Proyección de las emisiones de gases de efecto invernadero [GEI], Colombia 1998-2010. (Greenhouse Gas Emission Projections [GEI], Colombia 1998-2010) <i>Fabio González & Humberto Rodríguez</i>	497	Some further remarks on the local Path-Connectedness of Compactifications. (Algunos resultados sobre conexión y la arco-conexión locales de compactaciones). <i>Jairo A. Charris & Carmenza Moreno-Roa</i>	583
Opciones para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero [GEI], Colombia 1998-2010. (Options for Greenhouse Gas Emission [GEI] reduction) <i>Humberto Rodríguez & Fabio González</i>	507	Química y Bioquímica (Chemistry and Biochemistry)	
La corriente de Chorro Superficial del Oeste [del Chocó] y otras dos corrientes de Chorro en Colombia: climatología y variabilidad durante las fases del ENSO. (The Westerly Jet Stream [CHOCO Jet] and another two Jet Streams in Colombia: Climatology and variability during the ENSO phases) <i>Germán Poveda & Oscar J. Mesa</i>	517	Actividad de las enzimas ligninolíticas de <i>Phanerochaete chrysosporium</i> y su variación con la adición de Mn^{+2} (The activity of ligninolytic Enzymes from <i>Phanerochaete chrysosporium</i> and its variation by the addition of Mn^{+2}) <i>Gloria Alicia Jiménez, Amanda Mejía & Betty Lucy López</i>	587
Ecología (Ecology)		Estudio de la reactividad de cationes radicales α -amonio distónicos en solución. (Study of the reactivity of distonic radical cations α -ammonium in solution) <i>Luz Amalia Ríos, Rodrigo Paredes & William R. Dobier</i>	595
Comunidades vegetales y patrones de degradación y sucesión en la vegetación de los cerros occidentales de Chía, Cundinamarca, Colombia. (Plant Communities, degradation patterns and succession in the mountains of Chía, Cundinamarca, Colombia) <i>Sandra Cortés, Thomas van der Hammen & Orlando Rangel</i>	529	Zoología (Zoology)	
Física (Physics)		Crustáceos decápodos de fondos blandos en la franja costera del departamento del Magdalena, Caribe colombiano. (Crustacean decapods from soft substrates in the coastal band, Magdalena, Colombian Caribbean) <i>Martha Lucía Cortés & Néstor Hernando Campos</i>	603
A simple Method for Analyzing the tails of distributions. (Método sencillo para el análisis de colas de distribución) <i>Román Castañeda & Juan Carlos Correa</i>	555	The <i>Eleutherodactylus</i> of the <i>taeniatus</i> complex in Western Colombia: taxonomy and distribution. (Los <i>Eleutherodactylus</i> del complejo <i>taeniatus</i> en el occidente de Colombia: taxonomía y distribución). <i>John D. Lynch & María Cristina Ardila-Robayo</i>	615
Historia de la Ciencia (History of Science)		Notas (Notes)	
Todos los caminos conducen a Paul Erdős.		Las drogas liposomales. (Liposomal drugs) <i>Eduardo A. Castro</i>	625
		Vida Académica (Academic Life)	635
		Indice general del volumen XXIII, año 1999	641
		Indice de autores	643
		Constitución de la Academia (Members of the Academy)	644

INTEGRATED PEST MANAGEMENT AND ENTOMOPATHOGENIC FUNGAL BIOTECHNOLOGY IN THE LATIN AMERICAS: II. Key Research and Development Prerequisites

by

George G. Khachatourians & Edison Valencia*

Resumen

Khachatourians, G. G. & E. Valencia: Integrated pest management and Entomopathogenic fungal Biotechnology in the Latin Americas II- Key Research and Development Prerequisites. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **23**(89): 489-496. 1999. ISSN 0370-3908.

En una primera entrega (Valencia & Khachatourians, 1998), se plantearon las posibilidades de los hongos entomopatógenos. Aunque existen muchas posibilidades en el manejo integrado de plagas, aún restan obstáculos para su aplicación. Existen sólo dos especies, *Beauveria bassiana* y *Metarhizium anisopliae*, en las cuales se dispone del conocimiento necesario para su desarrollo industrial. Se requiere promover el uso comercial de los hongos entomopatógenos en Latinoamérica, de manera que se logre su aceptación a nivel general. En este trabajo se evalúan los puntos clave necesarios para avanzar en la investigación y el desarrollo industrial.

Palabras clave: Biotecnología, manejo integrado de plagas, hongos entomopatógenos, Latinoamérica.

Abstract

In the first part of this review article (Valencia & Khachatourians, 1998) we presented the special opportunity that entomopathogenic fungi (EPF) offer for integrated pest management (IPM) in the Latin Americas. As expected, along with the opportunities, there are challenges for the use of EPF. First that there are only two fungi, *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae*, for which some prerequisite knowledge of basic and applied mycology for industrial research and development (R & D) are in place. Because of precedent setting leadership in the development of certain EPF, e.g., *B. bassiana* in IPM, Latin America stands to contribute to and gain from future

* BioInsecticide Research Laboratory/ Microbial Biotechnology Laboratory. Department of Applied Microbiology and Food Science. College of Agriculture, University of Saskatchewan, Saskatoon, S7N 5A8. FAX: 306-966-8898 or Phone (306) 966-5032 or -5046, e-mail: khachatouria@sask.usask.ca

discovery research coupled to a strong and dependable industrialization effort. There is also need to develop the framework for public acceptance, newer commercialization potential and widespread use of EPF in IPM. Here we examine issues that are prerequisites for industrial R & D.

Key words: Biotechnology, integrated pest management, entomopathogenic fungi, Latin Americas.

1. Introduction and scope

The most important prerequisite for industrial production and use of EPF is the full understanding of fungal physiology, applied genetics and applied mycology. The field performance and ultimate commercial success of EPF in the practice of IPM hinge on this prerequisite knowledge. To date, only two fungi, *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* have been reasonably studied at the molecular level (Khachatourians, 1996). However, molecular dissection of several properties including growth, sporulation, virulence and environmental stress responses for either fungus remains a major challenge (Frankland, Magan & Gadd, 1996). Virulence depends on a complex interaction between physiological and genetic factors which determine a pathogen's ability to cause morbidity and mortality. Utilization of the tools of molecular sciences therefore should be the basis for a rational approach to exploitation of virulence and other particular traits of EPF in the context of rational design of pest insect biocontrol (RADBIO, Valencia & Khachatourians, 1998). Given the state of current knowledge of applied mycology and biotechnology there should be significant and improved understanding of the complex traits and properties of EPF and cross-disciplinary use of such knowledge in their production, formulation, and hence performance.

2. Fungal maintenance and culturing

For a vast majority of species of EPF considered for commercialization we still need information on culturing and growth of particular isolates (Khachatourians, 1996). Additional areas for further discovery research include methods of preparation and maintenance of fungal stocks, inoculum preparation, large scale growth and substrate utilization, the accumulation of reserve carbohydrates, extracellular hydrolytic enzymes production, and process technologies to maximize spore yield, separation, drying and milling, spore compatibility with formulation ingredients, and shelf-life conditions for storage of dry or liquid formulae. The impact for industry in the market place are significantly connected with the basic elements of applied fungal physiology and bioprocess engineering.

General considerations and criteria for terrestrial EPF formulations requires determination of a reasonable shelf-life under particular storage conditions for efficacy in an agricultural field. Further the control of target pests within distinct habitats may require different methods of application. Therefore, formulations should satisfy the particular modes of product delivery. Data obtained from on ground or aerial applicators would also need statistical considerations which are connected to commercialization. After these steps, product formulation and performance must be re-evaluated as they could further enhance product design. The compatibility of ingredients used for a formulation ideally should not compromise infectivity, shelf-life, high viability, and virulence. Fungal agents with an inherent limited shelf life can benefit from new formulation technologies such as micro-encapsulation and expedited transportation to delivery points.

3. Biophysical properties of spore surfaces

At the field level, EPF spores initiate their infective action through contact. Biophysical studies have indicated that there are nonspecific- followed by specific-, modes of associations, requiring hydrophobic and electrostatic attractions between spores of EPF and insect exoskeleton. Spores then initiate the second and more specific attachment, frequently mediated by lectin-like associations between spore surface sugars and the insect cuticle. The hydrophobicity of EPF spores is in part determined by proteins called hydrophobins (Wessels, 1997). A particular characteristic of insect epicuticle fatty acid and waxes is relevant to the hydrophobic or hydrophilic elements of the spore, favoring or impairing attachment. For example, a heavily waxy cuticle found in some homopterans is unlikely to be a target of EPF species with highly hydrophilic spores. Characterization of spore hydrophobicity by phase partition assay (Jeffs & Khachatourians, 1997) has been cumbersome. As a result, the employment of hydrophobicity tests a key initial step of selection of potentially superior pathogenic EPF has lagged.

A new salt-mediated aggregation and sedimentation assay (SAS) for the determination of hydrophobicity with corroborating correlation to occurrence of specific

proteins among EPF isolates has been developed in our laboratories (Jeffs & Khachatourians, 1997; Jeffs, Xavier, Mattai & Khachatourians, 1999). The SAS hydrophobicity assay could be readily done under laboratory conditions for a large number of strains to aid determination of the spore surface types and to improve the performance of the commercially exploitable fungal strains (Valencia, Cruz & Khachatourians, unpublished data). Hydrophobicity and its optimization could facilitate effective commercial formulation by determining the type and amount of final product ingredients such as emulsifiers and adherents required for particular environmental performance condition and the costs of production. Additionally, lectins found on the spores of EPF present another level of specificity for external interactions (attachment to insect surfaces) and internal interactions within the hemolymph (immune response) (Pendland & Boucias, 1986). Biophysical properties are particularly important from the environmental and ecotoxicological points of view. A high level of specificity of attachment to the cuticle of the pest insect vs. non-target organisms (NTO) could ensure a first order of interaction for pest insects, thus in favor of beneficial and NTOs in the agroecosystem.

4. Enzymes, toxins and pigments and pathogenicity or virulence

The entry into the host and successful growth of EPF needs production of extra-cellular hydrolytic enzymes such as proteases, chitinases and lipases, adhesive mucilaginous substance(s) and appressoria to aid penetration of a peg and spread of hyphal bodies. Also, production of toxins, whether peptides/ proteins or secondary metabolites is important in the disease process. In spite of the arsenals of toxins and hydrolytic enzymes, the speed or time with which EPF kill target pests is slow and unlike those of the synthetic chemicals. Chemical pesticides that work by contact mode of action work quickly and visibly in a matter of hours or a day. The performance of the microbial agents in general falls short of the chemicals and has generated a negative perception.

As long as EPF survive, spores should be able to germinate after contact with the host cuticle even if it occurs through the tarsi of the target insect as it moves on treated plant's or other surfaces in a field environment. The knowledge of the timing of the EPF life cycle should allow the selection of those isolates with fast germination rates (Bidochka, Pfeifer & Khachatourians, 1987). Early stages of infection events are critical to further successful performance particularly when these events

occur under extremes of environmental temperature and solar radiation. The comparative study of the germination and infectivity process of a number of industrial strains has offered interesting scenarios for selection of choice isolates for *in vitro* production (Valencia & Khachatourians, 1999).

Therefore there is need for added pre-requisite knowledge of the germination process if we wish to aid the manipulation of specific genes which signal germination of EPF either under mass culturing or preferential killing of target pest insects. Some of the germination specific signals affecting hyphal growth of *Beauveria* spp. reside in their response to fatty acids or waxes (Bidochka & Khachatourians, 1992; Leucona, Clement, Riba, Joulie & Juarez, 1997) and others may reside in the lesser understood outcome of enhance virulence after multiple host passages (Hayden, Bidochka & Khachatourians, 1992). Our recent observations of the presence of particular groups of genetic sequences in response to fungal growth in particular environments is offering exciting departures from conventional thinking in that a combination of genetic and epigenetic interrelations are suspected (Valencia, unpublished experiments).

After crossing the host surface layers, the invading EPF spreads within the host in spite of the surveillance mechanisms of the host immune system (Pendland, Hung & Boucias, 1993). Because EPF surface sugars and lectins are elicitors of the immune response, pathogenic strains could be identified among isolates with varying lectin-binding profiles. This strategy could minimize inconsistencies in insect biocontrol due to i) heterogeneity of immune responses of the pest, ii) presence of different stages of insect's development, or iii) their occurrence in a wide diversity of unrelated crops, exhibiting differential plant injury capacities, like the case of the tobacco bud worm *Heliothis virescens* (Lagunes, 1974).

Toxins, pigments and other secondary metabolites that could affect immune cell function and even singularly kill some insects, could be detoxified within certain insects (Dowd, 1988). For example, cyclic depsipeptides and linear peptides lower the immune system of the host (Boucias, Mazet, Pendland & Hung, 1995). In fact, toxic metabolites from *B. bassiana* affect filopodia formation and hemocytic activation (Pendland, Hung & Boucias, 1993). Because the genetic basis for the expression of such peptides is understood, the overproduction of linear or cyclic toxic peptides by fungal mutants in order to enhance pathogenicity should be within the realm of possibility (Pannacione & Annis, 2000).

Overall, the end point for EPF infections and their multi-step and complex processes are disease and death. There are new insights on the prerequisites for the killing time. Bioassay of a collection of *B. bassiana* strains isolated from around the world produced LT_{50} values ranging from 2 to 12 days (Khachatourians, 1992). Through the use of temperature sensitive mutants of *B. bassiana*, we were able to measure the 'critical milestone events' (CME) responsible for mortality in grasshoppers (Hegedus & Khachatourians, 1996c; 1996d). It appears as though CME determine the minimum time required for the insect kill. Although the widest practical application of CME is related to the search for, or engineering of isolates with a faster kill remains to be explored, the concept of a CME suggests that there is a minimum time which is required between the initiation of an insect disease and death. However, there needs to be a systematic testing of CME in terms of behavioral consequences of EPF infected insects for feeding, mobility, behavioral fever response, horizontal and vertical migration pattern changes.

5. General and molecular genetics

Three of the elements of the RADBIO concept, depend on the knowledge and application of genetics (Valencia & Khachatourians, 1998). Entomopathogenic fungi have been difficult subjects for genetic studies. Therefore, an understanding of the molecular basis for growth, development and pathogenicity is not fully understood. The most complete genetically studied EPF are *B. bassiana* and *M. anisopliae* (Khachatourians, 1996). Compatible fungal strains having complementary desirable characteristics (i.e. high enzymatic activity for one vs. a fast germination for the other), can be hybridized (Pfeifer & Khachatourians, 1992) to attain particular improvements of polygenic traits. This point is the third element of the RADBIO concept (Valencia & Khachatourians, 1998). Once the individual peptide or protein limiting infection of a fungus has been identified, its modification and improvement based on other genetic manipulative technologies could begin. For novel commercial use there are conditional lethal mutants of *B. bassiana* (Hegedus & Khachatourians, 1994; Chelico & Khachatourians, 1999). These mutants are non-viable at certain low or high temperatures and therefore self-limit environmental survival and spread some time after spray as mycoinsecticides. Such traits can be an advantage for pest control cold sensitive mutants in temperate and heat sensitive mutants in tropical zones if the introduction of new pathogens for the management of exotic pests is required.

However, in spite of the need, in other EPF such as *Verticillium lecanii*, *Paecilomyces farinosus*, or *M. anisopliae* newer information about molecular genetics is slow to be gathered. For example, electrophoretic karyotyping of the chromosome(s) for the development of physical genomic maps and localization of genes involved in pathogenic and virulence properties is still outstanding. Information about molecular genetics is being collected through localization of genes in pathogenic and virulence properties, restriction fragment length polymorphisms, random amplified polymorphic DNA (RAPD), transposons, internal transcript spacer of ribosomal DNA and PCR using consensus tRNA gene primers (Kosir, MacPherson & Khachatourians, 1991; Tiagano-Milani, Honeycutt, Lacey, Assis, McClelland & Sobral, 1995; Rohel, Couteaudier, Paperok, Cavalier & Dedryver, 1997; Maurer, Rejasse, Capy, Langin & Riba, 1997; Hegedus & Khachatourians, 1993a; 1993b).

The prerequisite knowledge of molecular genetics of EPF also represents advantages not only for taxonomy and biosystematics, but also for commercial product R & D. DNA probes can identify genera, species, varieties and even mutants (Hegedus & Khachatourians, 1993a; 1993b Hegedus & Khachatourians, 1996a; 1996b). Using systems such as DNA probes to differentiate between isolates, PCR amplification and allelic polymorphism, one can identify base changes within hundreds of nucleotides. RAPD analysis in conjunction with protein fingerprints can be effective in monitoring of the biological and genetic stability of isolates (Hegedus & Khachatourians, 1996a; 1996b; 1996c).

After a build-up of optimistically hopeful scenarios, a word of caution is necessary. Because of the multigenic nature of virulence and the complexity of the EPF-pest interactions, the development of "improved strains" based only on recombinant DNA technologies may not necessarily enhance commercial deployment of EPF for their biocontrol potential. This is because in some jurisdictions there will be the concomitant and additional impediment of registration as the "genetically engineered" component of rDNA techniques, which would remove the "natural status" of wild type isolates, thus creating the need for more tests for environmental impacts. However, rDNA techniques are powerful in the case of monogenic traits involved with the pathogenic process which is not a general feature of EPF as insect biocontrol agents. In this sense, it would also be useful to consider the pace of acceptance of transgenic food plants, before one jumps to the conclusion. This simple strategy might determine the future outcomes for those

companies who subscribe to the use of transgenic plants, for example *Bacillus thuringiensis* based plants, as there is a continued shift in the public acceptance in certain regards (Epstein, 1999).

6. Ecological and regulatory considerations.

Ideally, it is in part the ecological axioms that should be the foundation of a regulatory framework for approval of EPF as insect biocontrol agents. It is unlikely that EPF can suppress the target pest with a single application. As in nature, deliberately released EPF could not persist at numbers higher than that which occur within natural populations. Repeat applications when needed unfortunately could add to the public belief that similar to the chemical pest control agents, EPF will impact negatively on the ecosystem. This belief would be contrary to a large body of literature of EPF in the larger context of the ecosystem. In the ecosystem, EPF success depends on how it approaches the pest, transmits and disperses itself. Questions of epizootics and enzootics are complex and depend on particular seasonal, pest generation, weather condition and regional characteristics. After the death of diseased insects, fungal outgrowth, the production and dispersal of spores to new hosts and the environment occurs. These factors are not only important for ecological studies but also in public understanding of EPF commercialization.

Is there real or perceived hazard associated with EPF to warrant delay in further environmental experimentation? Regulatory agencies dealing with the ever changing state of the knowledge and public perception have been flexible in granting permission for testing. However, instead of continued tightening of the rules on the regulation for 'biological' products for release into the environment, decisions should be based on *a priori* scientific and validated proof and not on fear. Without compromising debate, there is an urgent need to move forward with reasonable experimental use permits and continue acquisition of data on ecological ramifications of EPF, as many are naturally occurring microorganisms within their niche specific environments.

7. Commercialization, formulation and application.

Commercialization of mycoinsecticides is a serious and ultimate component of total R & D efforts in many parts of the world. This endeavor has been more visible in Latin Americas and China (Feng, Poprawski & Khachatourians, 1994), specifically with *B. bassiana*. With a worldwide resurgence of interest in the use of

EPF significant advance in development and manufacturing can be expected.

In terms of specific commercial niches, there is a large inventory of insect biocontrol needs that can be satisfied with EPF. *Beauveria bassiana* affects over 400 insect species, representing a commercial market equal to or larger than that covered by bacteria-based products.

Discovery and applied research of EPF is half of the equation for commercialization. The other half is associated with questions of post-formulation and pre- and post- application issues; bulk transportation, storage, customer perception of performance and pricing. With the issue of use, EPF do not pose much danger, however, the end user education is important. The user needs to know that they are dealing with a microbiological agent and due care must be taken with instructions from handling to spraying. Although safe at final spray dosage, accidental human exposure to concentrates of EPF can occur and must be prevented through special label warnings and education, on their application and use.

8. Business challenges and opportunities in EPF in Latin America

Latin American countries present an average of annual population growth of 1.8%, which is still one of the lower rates among world continental regions. Additionally, only 15% of the potentially arable land has been brought to technologically advanced agricultural production (Stubler & Kern, 1996).

A proportion of these lands could be progressively lost to urbanization, industrialization, erosion and salinization (Stubler & Kern, 1996). However, low technology (slash and burn) agriculture is the major threat to the preservation of arable lands. Urgent actions should be taken to wisely utilize the generally favorable conditions of agricultural and peri-agricultural zones in Latin America. These conditions should put this region in a very competitive position.

The "lower degree of development" in parts of Latin Americas can represent extraordinary opportunities for designing and attaining an adequate model of sustainability and better development with utilization of EPF through the RADBIO concept (Valencia & Khachatourians, 1998). In our opinion RADBIO can be compatible with the needs, opportunities and limitations of the region, in the context of the production process and economics. One opportunity involves enhancing the sustainability of farming lands and the future of the

remaining natural ecosystems in Latin America. This could significantly depend on our ability to demonstrate the advantages of the combination of conventional and innovative concepts of planting for food production. Trends in applied mycology and fungal biotechnology project a significant chance for the adoption and utilization of EPF in pest management schemes. Already, farmers who had to deal with outbreaks of *la broca*, or the coffee bean borer (CBB, *Hyphtenemus hampei*) are finding that an IPM program using *B. bassiana* in combination with certain synthetic chemical insecticides (at much lower administration rates per hectare per year), can control the insect pest. As CBB is not susceptible to *B. thuringiensis* or Baculoviruses, the choice for EPF for the IPM of this insect pest remains in the long term very attractive. In Colombia efficiencies in the management of both coffee plants and CBB have reduced the pest control costs and have increased product quality and profitability, raising the minimum international coffee price in 1998 to US \$1.75 and in Brazil, a figure of US\$0.70-80 a pound (Thompson, 1998). Colombia has 16% share of the world coffee market and a reasonably optimistic future for this commodity (Thompson, 1998).

The particular conditions of biodiversity, in terms of pest complexes and beneficial arthropods in most of the agricultural ecosystems in Latin America, gives EPF a significant potential in crop protection strategies. The practical advantages of EPF alone or in combined applications as in IPM are powerful enough to ensure the development of innovative and cost-effective strategies of crop protection for Latin America.

The sustainability of farming lands and the future of the remaining natural ecosystems in Latin America significantly depends on the capacity and diligence of people to develop and introduce the practice of new concepts such as RADBIO, and use of IPM-EPF alternatives. What needs to be done for the next twenty years, has to start now. The momentum for agricultural production is high and the technological tools are in place. There will be a global demand for new biocontrol agents, as many governments are taking the political decision in favor of sustainable agricultural systems (Matteson, 1995). These decisions are formally recognizing IPM and application of bioinsecticides including EPF because there are many emerging pests resistant to the new generation of transgenic plants bearing *B. thuringiensis* toxins and recent data indicates that the refugia based models for management will not succeed or may be difficult to meet in practice (Dove, 1999). The reason behind is that Bt resistance is a dominant trait.

The combination of fungal biotechnology and innovative IPM modeling approaches, appears very promising in the context of a long term sustainable agriculture. Furthermore, such approaches serve the purpose of a low input sustainable agriculture (LISA), which is adaptable to newer technologies and compatible with current crop protection and crop production strategies. Companies providing systems of integrated crop production will be in a strong position (Stubler & Kern, 1996). A combination of market pull, science push and consumer in the driver's seat should be ideal for growth of LISA in agriculture of Latin Americas. The challenges and the opportunities that lie ahead could be a benefit to all.

A positive outcome can be forecasted, if the prerequisite R & D work, industrial base, expenditure in scientific research of highest impact is adopted by the appropriate sectors (Macilwain, 1999). Many Latin American governments are beginning to address the problem of lack of resources and timeliness of access to materials. Ministries of science are adopting a stronger push for institutional and collaborative basic and applied research to increase national profiles of countries such as Brazil, Argentina, Venezuela, Chile and Colombia both in R & D expenditures and its outcomes. Having said that, it is equally important to translate the discoveries from Latin America to intellectual property rights. Brazil and Korea both produce 1% of the science published in international journals. Yet, whereas Korea generates 1% of patents filed at the United States patent office, Brazil record is only 0.2% (Macilwain, 1999). Clearly there is more that can be done and certainly as we offered in our article, some of these come from the use of applied mycology and biotechnology in the arena of IPM through appropriate R & D initiatives.

References

- Bidochka, J. M. Pfeifer, T. A. & G. G. Khachatourians. 1987. Development of the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* in liquid cultures. *Mycopathologia* 99: 77-83.
- Bidochka, M. J. & G. G. Khachatourians, 1992. Growth of the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* on cuticular components from the migratory grasshopper, *Melanoplus sanguinipes*. *Journal of Invertebrate Pathology* 59: 165-173.
- Boucias, D. G., Mazet, I, Pendl and J. & S.Y. Hung, 1995. Comparative analysis of the in vivo and in vitro metabolites produced by the entomopathogen *Beauveria bassiana*. *Canadian journal of Botany* 73: S1092-S1099.
- Chelico, L. & G. G. Khachatourians. 1999. Initial characterization of cold-sensitive mutants of the entomopathogen, *Beauveria bassiana*. Programme Joint Annual Meeting, Canadian Entomological Society

and Entomological Society of Saskatchewan, September 25-29, Abstracts, pg. 37.

- Dove, A. 1999. Bt resistance plan appraised. *Nature Biotechnology* 17: 531-532.
- Dowd, P. 1988. Detoxification of mycotoxins by insects. In Mullin C.A. Scott, J. G. (eds.). *Molecular mechanisms of insecticide resistance: diversity among insects*. American Chemistry Society Press. Washington DC. pp. 264-275.
- Epstein, J. A seedy business. 1999. *Latin Trade* 7(10): 26-27.
- Feng, M.-G., Poprawski, T.J. & G. G. Khachatourians. 1994. Production, formulation and application of the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* for insect control worldwide. *Biocontrol Science and Technology* 4: 3-34.
- Frankland J. C., Magan, N., & G.M. Gadd. 1996. *Fungi and environmental change*. Cambridge University Press. Cambridge, U. K.
- Hayden, T. P. Bidochka, M. J. & G. G. Khachatourians. 1992. Entomopathogenicity of several fungi towards the English grain aphid (Homoptera: Aphididae) and enhancement of virulence with host passage of *Paecilomyces farinosus*. *Journal of Economic Entomology* 85: 58-64
- Hegedus, D. D. & G. G. Khachatourians. 1993a Construction of cloned DNA probes for the specific detection of the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* in grasshoppers. *Journal of Invertebrate Pathology* 62: 233-240.
- _____. 1993b. Identification of molecular variants in mitochondrial DNAs of members of the genera *Beauveria*, *Verticillium*, *Paecilomyces*, *Tolypocladium* and *Metarhizium*. *Applied and Environmental Microbiology* 59: 4283-4288.
- _____. 1994. Isolation and characterization of conditional lethal mutants of *Beauveria bassiana*. *Canadian Journal of Microbiology* 40: 766-776.
- _____. 1996a. Detection of the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* within infected migratory grasshoppers (*Melanoplus sanguinipes*) using polymerase chain reaction and DNA probe. *Journal of Invertebrate Pathology* 67: 21-27.
- _____. 1996b. Identification and differentiation of the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* using polymerase chain reaction and single-strand conformation polymorphism analysis. *Journal of Invertebrate Pathology* 67: 289-299.
- _____. 1996c. The effects of temperature on the pathogenicity of heat-sensitive mutants of the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* toward the migratory grasshopper *Melanoplus sanguinipes*. *Journal of Invertebrate Pathology* 68: 160-165.
- _____. 1996d. Analysis of cellular defense reactions of the migratory grasshopper *Melanoplus sanguinipes*, infected with heat-sensitive mutants of *Beauveria bassiana*. *Journal of Invertebrate Pathology* 68: 166-169.
- Jeffs, L. B. & G. G. Khachatourians. 1997. Estimation of spore hydrophobicity for members of the genera *Beauveria*, *Metarhizium* and *Tolypocladium* by salt-mediated aggregation and sedimentation. *Canadian Journal of Microbiology* 43: 23-28.
- Jeffs, L. B., Xavier, I. J., Mattai, R., & G. G. Khachatourians. 1997. Estimation of spore hydrophobicity for members of the genera *Beauveria*, *Metarhizium* and *Tolypocladium* by salt-mediated aggregation and sedimentation. *Canadian Journal of Microbiology* 43: 23-28.
- Khachatourians, G. G. 1992. Virulence of five *Beauveria* strains *Paecilomyces farinosus* and *Verticillium lecanii* against the migratory grasshopper *Melanoplus sanguinipes*. *Journal of Invertebrate Pathology* 59:212-214.
- _____. 1996. *Biochemistry and Molecular Biology of Entomopathogenic fungi*. The Mycota IV: Human and Animal Relationships. Howard D. and Miller, J. D. (Eds.). Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. pp. 331-363.
- Kosir, J. M. MacPherson, J.M. & G. G. Khachatourians. 1991. Genomic analysis of a virulent and a less virulent strain of the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana*, using restriction fragment length polymorphisms. *Canadian Journal of Microbiology* 37: 534-541.
- Lagunes, T. A. 1974. Resistencia diferencial a insecticidas entre poblaciones de *Heliothis virescens* (Lepidoptera: Noctuidae) que atacan algodonero, tomate y maiz en Mexico. Tesis de Maestria en ciencias. Colegio de postgraduados, Chapingo, Mexico.
- Leucona, R., Clement, J.-L., Riba, G., Joulie, C., & P. Juarez. 1997. Spore germination and hyphal growth of *Beauveria* sp. on insect lipids. *Journal of Economic Entomology* 90: 119-123.
- MacIlwain, C. 1999. Science in Latin America. *Nature* 398: Supplement to April issue. pp. A4-29.
- Matteson, P. C. 1995. The 50% pesticide cut in Europe: a glimpse of our future? *American Entomologist* 41: 210-220.
- Maurer, P. Rejasse, A. Capy, P. Langin, T. & G. Riba. 1997. Isolation of the transposable element *huffer* from the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* and insertion mutagenesis of the nitrate reductase structural gene. *Molecular and General Genetics* 256: 195-202.
- Panaccione D. G. & S. L. Annis. 2000. Use of fungal peptides and peptide synthetases in agri-food industry. In *Applied Mycology and Biotechnology*, Vol. I: Foods and fungi, (Eds.) G. G. Khachatourians and D. K. Arora, Elsevier Science, In Press.
- Pendland, J. C. & D. G. Boucias. 1986. Lectin binding characteristics of several entomogenous Hyphomycetes: possible relationship to insect hemagglutinins. *Mycologia* 78: 818-824.
- Pendland, J. C., Hung, S.-H., & D. G. Boucias. 1993. Evasion of host defense by *in vivo*-produced protoplast like cells of the insect mycopathogen *Beauveria bassiana*. *Journal of Bacteriology* 175: 5962-5969.
- Pfeifer, T. A. & G. G. Khachatourians. 1992. *Beauveria bassiana* protoplast regeneration and transformation using electroporation. *Applied and Environmental Microbiology* 38: 376-381.
- Rohel, E. Couteaudier, Y. Paperok, B. Cavalier, N. & Dedryver, C. A. 1997. Ribosomal internal transcribed spacer size variation correlated with RAPD-PCR pattern polymorphisms in the entomopathogenic fungus *Erynia neoaphis* and some closely related species. *Mycological Research* 101: 573-578.
- Stubler, H. & M. Kern. 1996. *Biotechnology in crop protection and crop production: the view of the industry*. Ein Unternehmen von Hoechst und Schering. DSE-Workshop. pp. 1-7.

- Thompson, A.** 1998. Colombian coffee. *Latin Trade*. 6(3):74-75.
- Tiagano-Milani, M. S. Honeycutt, R.J. Lacey, L. A. Assis, R. McClelland, M. & B. W. S. Sobral.** 1995. Genetic variability of *Paecilomyces fumosoroseus* isolates revealed by molecular markers. *Journal of Invertebrate Pathology* 65: 274-282.
- Valencia E. P. & G. G. Khachatourians.** 1999. Selection of the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* by means of a developmental profile model. Programme Joint Annual Meeting, Canadian Entomological Society and Entomological Society of Saskatchewan, September 25-29, Abstracts, pg. 72.
- _____. 1998. Integrated pest management and entomopathogenic fungal biotechnology in the Latin Americas. I. Opportunities Revista de la Academia Colombia de Ciencias Exactas Fisicas Y Naturales. 22(82):193-202.
- Wessels J. G. H.** 1997. Hydrophbins: Proteins that change the nature of the fungal surface. *Advances in Microbial Physiology* 38: 1-45.

PROYECCION DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI), COLOMBIA 1998-2010

por

Fabio González B.* & Humberto Rodríguez M.**

Resumen

González B. F. & H. Rodríguez M.: Proyección de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), Colombia 1998-2010. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 23(89):497-505, 1999. ISSN 0370-3908.

El escenario base de las emisiones 1998-2010 fue generado a partir de las proyecciones de demanda de energía y del comportamiento del sector no-energía para el periodo. Los gases considerados fueron los mismos que se tomaron para el inventario de GEI de referencia de 1990. Una de las conclusiones más importantes es que las emisiones del sector energía que significaron el 31% de las emisiones totales en 1990, para el año 2010 representarán el 72%, mientras que las emisiones del sector no-energía decrecerán de 69% a 28% en el mismo periodo. El total de las emisiones crecerá en el periodo 1990-2010 un 4%, pasando de 167 Mton en 1990 a 174 Mton en el 2010.

Palabras clave: Emisiones Gases de efecto invernadero, Colombia, Proyección, Inventario.

Abstract

The Greenhouse Gas Emissions baseline scenario 1998-2010 was developed from the energy and no-energy sector projections. This study considered the same greenhouse gases as the 1990 inventory. One of the major findings is the increase in the participation share of the energy sector from 31% in 1990 up to 72% in 2010, while the non-energy sector decrease its share from 69% to 28% in the same period. The total emissions increase from 167 Mt/year in 1990 to 174 Mt/year in 2010, an increase of only 4%.

Key words: Greenhouse gas emissions, Colombia, Projections, Inventory

* Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá, D.C., email: fgonzal@ciencias.ciencias.unal.edu.co

** Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá, D.C., email: hrodrig@colciencias.gov.co

Introducción

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, en inglés: UNFCCC) suscrita por 155 países en Río de Janeiro, Brasil, en 1992, tiene como objetivo la “estabilización de las concentraciones de los Gases de Efecto de Invernadero (GEI) en la atmósfera a un nivel tal que se puedan evitar interferencias antropogénicas peligrosas para el sistema climático” (Artículo 2). Las directrices para alcanzar esta meta incluyen que todos los países que suscribieron el convenio “deberían proteger el sistema climático para el beneficio de las generaciones presentes y futuras de la humanidad sobre la base de la equidad y de acuerdo con sus responsabilidades comunes pero diferenciadas, y su respectiva capacidad”, y que “las Partes deberían tomar medidas preventivas para anticipar, prevenir o minimizar las causas del cambio climático y mitigar sus efectos adversos” (Art. 3).

Colombia adoptó la CMNUCC el 09 de Mayo de 1992 y el Congreso Nacional la aprobó por Ley 164 de 1995. La Corte Suprema de Justicia la consideró exequible y fue ratificada el 22 de Marzo 1995. Entró en vigencia para el país el 20 de Junio de 1995. Como país no perteneciente al Anexo I tiene los compromisos generales establecidos para todos las naciones que suscribieron las CMNUCC:

- Desarrollar, actualizar periódicamente, publicar y ofrecer a la conferencia de las Partes los Inventarios Nacionales de Emisiones antropogénicas de todos los GEI no controlados por el protocolo de Montreal.
- Emplear la metodología IPCC para su elaboración.
- Formular, implantar, publicar y actualizar regularmente programas nacionales que contengan medidas para mitigar el cambio climático mediante el tratamiento de las emisiones antropogénicas.

Dentro de este contexto, la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN), con el apoyo de la Sociedad Alemana de Cooperación Técnica (GTZ) y el aval del Ministerio de Medio Ambiente, realizó durante 1995 y 1996 el *Inventario de Gases de Efecto Invernadero - Colombia 1990*¹. Como continuación de este estudio, la ACCEFYN (nuevamente con el apoyo de la GTZ) realizó durante 1998 este estudio: *Opciones para la Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Colombia 1998-2010*. Este estudio se realizó siguiendo las guías metodológicas desarrolladas por la UNEP^{2 3} y el US Country Studies Programm⁴. El

propósito de adoptar metodologías internacionalmente aceptadas es facilitar la comparación de los resultados entre países.

Este artículo presenta los resultados de las proyecciones de emisiones de GEI para Colombia en el Caso Base y para el periodo 1998-2010.

Caso base 1998-2010

Los sectores que afectan las emisiones de GEI son los de energía y no-energía. El caso base describe la evolución esperada de estos sectores para el periodo en consideración, a partir de unas expectativas dadas de desarrollo del país.

Para el caso base del sector energía tomamos en cuenta las cifras y los análisis realizados por la Unidad de Planeamiento Minero Energético (UPME) que es la entidad del Ministerio de Minas y Energía encargada de generar los planes, programas y políticas energéticas, recopilar información histórica y hacer las proyecciones de demanda de energía para el corto, mediano y largo plazo. Mediante la utilización complementaria de modelos econométricos y analíticos, la UPME estimó la demanda a nivel de energía final, teniendo en cuenta las posibles sustituciones que pueden producirse en los sectores residencial, industrial y del transporte, ante la diversificación esperada de la canasta de energéticos en Colombia^{5 6 7}.

Para estimar las proyecciones de requerimientos de los energéticos del sistema nacional, la UPME empleó el modelo analítico ENPEP⁸, que es realimentado con las proyecciones econométricas. El modelo usa una aproximación no lineal de equilibrio general para determinar el balance de oferta y demanda de energía y toma en cuenta los procesos, programas o acciones encaminados a la sustitución y uso eficiente de energía y al uso de equipos eficientes.

Mediante la utilización complementaria de estos dos tipos de modelos es posible utilizar los datos históricos de la evolución de la demanda para determinar su tendencia histórica y modificarla a través, de la incorporación de los efectos esperados al aplicar diferentes acciones, tales como el diseño de programas de uso racional de energía, la sustitución de energéticos (por ejemplo, gas natural por electricidad para cocción), ó cambios tecnológicos en equipos, entre otros, lo cual hace que esta metodología esté muy acorde con los objetivos específicos del estudio de mitigación desarrollado a través del presente documento. Esta metodología permitió obtener

la demanda a nivel de energía final sin desagregar completamente subsectores económicos ni usos energéticos.

De las diferentes combinaciones de escenarios discutidas por la UPME (tarifarios, sustitución de combustibles etc.), la UPME tomó como escenario base lo que correspondería a un escenario de "no hacer nada en materia ambiental", es decir, la trayectoria energética del país si se mantienen las políticas actuales y las tendencias de demanda de energía. Este está construido bajo los siguientes supuestos:

- El escenario macroeconómico parte de la base del escenario oficial del Departamento Nacional de Planeación 1997-2000. A partir del año 2001, la tasa de crecimiento media del PIB se supone como de 4.5% anual, valor cercano al crecimiento medio histórico de largo plazo en el país (ver tabla 1):

Tabla 1. Tasa de crecimiento del PIB utilizado para los escenarios de proyección de la demanda de energía

1997	1998	1999	2000	2001-2010	Promedio
3.6%	3.8%	5.11%	4.7%	4.5%	4.44%

Fuente: Plan Energético Nacional 1997 - 2010, UPME, 1997

- El incremento tarifario en el Sector Residencial se rige por la Ley 287, según la cual la tarifa para el sector residencial alcanza el 86.4% del costo de referencia en el año 2000, y a partir de allí se mantiene constante en términos reales. Los precios del gas están ligados con los topes en boca de pozo establecidos por la resolución de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), y los costos de transporte y distribución del gas. Los incrementos reales de las tarifas en el sector residencial son los indicados en la tabla 2:

Tabla 2. Incremento tarifario utilizado en los escenarios para proyección de la demanda de energía

1997	1998	1999	2000	2001	2002-2010
1.9%	0.0%	12.3%	11.2%	5.3%	0.0%

Fuente: Plan Energético Nacional 1997 - 2010, UPME, 1997

- En el sector residencial urbano se supone que el costo del crédito es el IPC (inflación anual) más 4 puntos, y los tiempos de financiación son, para el primer escenario, de 5 años.

- En el alumbrado público, se dejan las proyecciones económicas para esta demanda.

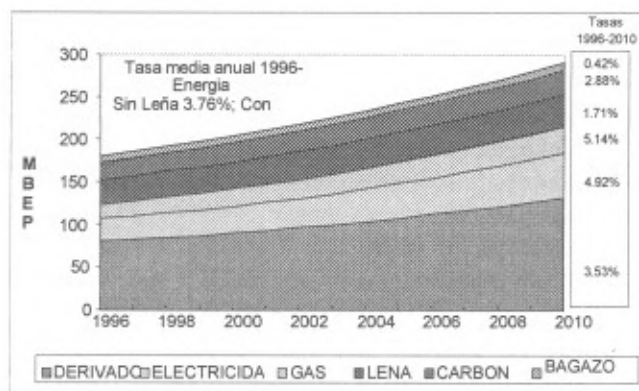
- No se considera incremento alguno en la capacidad de refinación.

- La estrategia de expansión del sector eléctrico escogida para el caso base es la LP-1⁹. En el corto plazo (1997-2000), se prevé la instalación de 1783 MW a gas, 150 MW a carbón y 732 MW hidráulicos. En el largo plazo (2001-2010) se instalarían adicionalmente 3607 MW a gas, 450 MW a carbón y 2531 MW hidráulicos.

Por lo tanto este es el escenario más realista y más probable, ya que la planeación en este sector se ha venido cumpliendo de manera estricta en los últimos años. Estos planes de desarrollo se están revisando y actualizando permanentemente. El crecimiento de la demanda esperado para los próximos años, hasta el 2010, se ilustra en la figura 1.

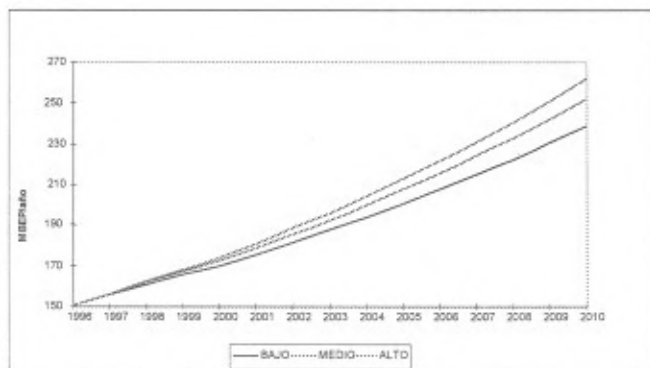
En el año 2010, el país estará consumiendo (sin considerar la leña) 252.6 MBEP, cerca de 100 millones más que en la actualidad. Cuando se suma la leña, el consumo parte de 180 MBEP y se incrementa hasta 290 MBEP. En la figura 2 se presenta la banda de proyección de demanda de energía final (sin leña) para el caso base ante cambios de escenarios del PIB. Para todo el período de estudio (1996-2010) se prevé un crecimiento máximo del 4.03% anual y uno mínimo del 3.35%.

En 1996, la UPME publicó una actualización del "Plan de Expansión de Generación - Transmisión" ³. Este plan presentó, a los distintos agentes, cuatro estrategias de desarrollo del sector eléctrico, diseñadas para el corto, mediano y largo plazo.



Fuente: Plan Energético Nacional 1997 - 2010, UPME, 1997

Figura 1 Demanda de energía final (MBEP)



Fuente: Plan Energético Nacional 1997 - 2010, UPME, 1997

Figura 2. Franja de Proyección de la demanda de Energía Final (MBEP/año)

El corto plazo se considera el periodo entre 1996 y el año 2000. En este periodo la UPME incluye únicamente los proyectos de generación y transmisión de energía eléctrica que ya están definidos. Varios de estos proyectos se encontraban, para la fecha de publicación del Plan de Expansión Eléctrico, bajo diseño y algunos otros inclusive en construcción, por lo cual el corto plazo es igual para las cuatro estrategias.

Para el largo plazo (2001-2010) se toman en consideración distintas combinaciones de plantas a gas, carbón e hidroeléctricas. La UPME propuso cuatro estrategias distintas, identificadas con las siglas LP-1, LP-2, LP-3 y LP-4. La estrategia LP-4 es la que presenta la mayor componente térmica a carbón y es por lo tanto la que se considera para los diferentes análisis de reducción de emisiones realizados en este estudio, por ser el escenario con mayor cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero.

El sector no-energía considerado en este estudio contempla los subsectores forestal y agropecuario. Los principales supuestos para el desarrollo del sector forestal son una tasa de deforestación de 200.000 ha por año, que se mantendrá hasta el año 2010. Durante 1995, el área aprovechada en los bosques naturales fue de aproximadamente 35.000 hectáreas, con un volumen estimado en 1'969.216 m³ de madera en bruto, de los cuales 1'386.772 m³ fueron registrados legalmente y alrededor de 582.444 m³ evadió el control estatal¹⁰. Se considera que esta tendencia de consumo nacional se mantendrá durante los próximos 10 años con una tasa de crecimiento anual del 4%.

El área reforestada acumulada hasta 1995 era de 270.000 hectáreas⁶. La reforestación con fines comerciales para los próximos 10 años se estima en 332.000 ha¹¹,

la cual será realizada en su totalidad por el sector privado. También se tiene previsto el establecimiento de 231.000 ha en reforestación de carácter protector, que serán plantadas por las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible con el apoyo del Ministerio del Medio Ambiente, a través de los créditos BID y BIRF.

De otra parte se tiene previsto que la agroforestería (sistemas agroforestales y silvopastoriles) abarquen un área de 195.000 ha. Una gran parte de esta actividad se realizará en la zona cafetera donde se estima que 300.000 ha de café serán reconvertidas a otros usos, de las cuales alrededor de 175.000 ha se convertirán en sistemas agroforestales.

En cuanto se refiere al sector agropecuario se han hecho las siguientes suposiciones: Para el sector agrícola y en particular para los cultivos considerados en el inventario de GEI, tales como, arroz, maíz, caña de azúcar, palma africana, algodón, etc., se estima muy poca reactivación de las actividades productivas tanto en un lapso de tiempo corto (1996-2002), como a mediano plazo (2002-2008). Por ejemplo se supone que el área total cultivada en arroz no sufrirá cambios notorios, sino que presentará fluctuaciones - de máximo un 5% del total cultivado- alrededor de 400 mil hectáreas, y posiblemente ligeros cambios en la composición de la distribución de arroz continuamente inundado e intermitentemente inundado que podría variar de un 65-35%, (inventario GEI, 1990), a un valor cercano a 60-40%¹.

Para el sector pecuario se hicieron las siguientes consideraciones: el hato ganadero crecerá a un ritmo entre 2 y 2,5% anual. El sector avícola crecerá a un ritmo constante del 2,5% anual. El sector pecuario mantendrá la tasa de crecimiento observada en el periodo anterior (2,5% anual). Los demás animales considerados en el inventario se calcula crecerán a un ritmo que varía entre el 1 y el 2% anual.

La quema de residuos agrícolas en el campo se sigue considerando como una práctica poco frecuente en el país y, por lo tanto, es tomada como una fuente despreciable en la contabilidad de emisiones GEI. La quema de sabanas, como práctica tradicional que es, se estima que seguirá contribuyendo a la emisión de GEI prácticamente de la misma forma, puesto que la extensión de sabanas del país sometidas a este tipo de acción seguirá siendo la misma cantidad considerada en el inventario de GEI que toma como año base 1990. Esto significa que para la quema de sabanas no se considerará ninguna tasa de crecimiento.

Emisiones del caso base

Para calcular las emisiones del caso base se consideraron por separado las del sector energía y las del sector no-energía.

Emisiones del sector energía

Para el sector energía se parte de las proyecciones generadas por el modelo ENPEP y empleando el módulo IMPACTS se calculan las emisiones con los factores de emisión de acuerdo al tipo de tecnología. Estos factores fueron tomados de la metodología del IPCC¹² y de las normas AP-42¹³. Para el sector no-energía, las emisiones de CO₂ y CH₄ se han estimado con base en las suposiciones descritas y haciendo uso de la metodología del inventario.

CO₂: La Figura 3 muestran las emisiones totales de CO₂ para los diferentes sectores de la economía. Las emisiones totales fueron de 66.4 Mton en 1996. Existe una tendencia creciente en las emisiones y se espera que para el año 2010 estas superen los 120 Mton, es decir, para finales de la próxima década se tendrán el doble de las emisiones de CO₂ de las que se tuvieron en el año de 1990.

El mayor crecimiento en las emisiones se debe esperar en el sector eléctrico. Para 1996 este sector fue responsable del 8% de las emisiones de CO₂ totales, pero para el 2002 dicho porcentaje aumentará al 14% y para el 2008 alcanzará el 22%.

Aunque las emisiones de los sectores transporte e industrial aumentarán, se espera que su participación porcentual en las emisiones totales se reduzca debido al gran aumento del sector eléctrico. La participación de estos dos sectores fue del 32% y del 34% respectivamente durante 1996, pero para el 2008 estos descenderán hasta el 31 y el 25%, respectivamente. Es importante resaltar que la participación en las emisiones totales del sector industrial se reduce del 34 al 25% debido principalmente a la penetración del gas natural en este sector. El porcentaje de participación del sector residencial + comercial no varía mucho durante el periodo de estudio.

CH₄: Las emisiones de metano del sector energía tienen su origen en las emisiones fugitivas de este gas en la minería del carbón, la explotación del petróleo y el manejo del gas natural, y en los procesos de combustión que se dan en los diferentes sectores de la economía (denominados resto energía). La Figura 4 muestra la evolución esperada de estas emisiones dentro del caso base.

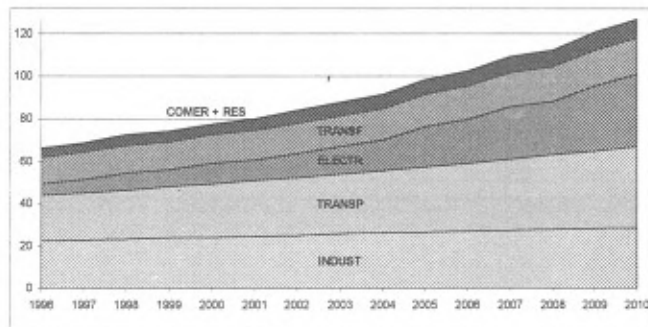


Figura 3. Emisiones de CO₂ por Sectores Económicos (Millones de toneladas anuales)

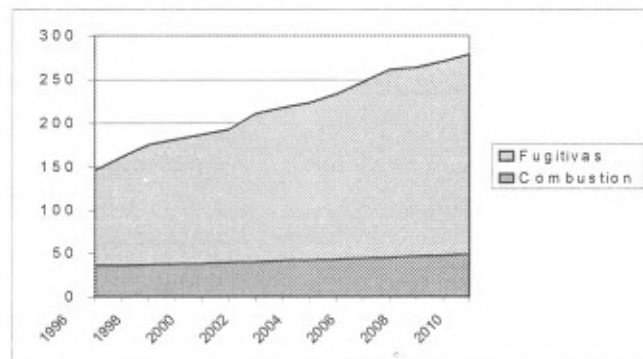


Figura 4. Emisiones de CH₄ del Sector Energía (Miles de toneladas anuales)

Como puede observarse en la figura 4, de las emisiones totales del año 1996, 146 kton, el 75% corresponden a las emisiones fugitivas mientras que en el año 2010 estas representarán el 82% de las mismas, debido al incremento en la minería del carbón y la explotación petrolera.

De las emisiones por combustión (resto energía), la mayor contribución es del sector residencial + comercial debido a las emisiones de metano provenientes del consumo de la leña. Sin embargo su participación tiende a disminuir, pues, pasarán del 67% del total por combustión en 1996 a 59% en el 2010.

NMVOG: Las emisiones de los sectores comercial, industrial y eléctrico son despreciables en comparación con las de los sectores residencial y de transporte, tal como se puede apreciar en la figura 5. Al igual que en los casos anteriores se presenta un aumento sostenido de las emisiones de estos dos sectores. Con respecto a la participación porcentual de estos dos sectores en las emisiones totales, el sector residencial/comercial disminuye del 43%

del total emitido en 1996 hasta el 38% en el 2008. Por otro lado, el porcentaje de participación del sector transporte aumenta del 57% en 1996 hasta el 62% en el 2008.

NOx: Los principales sectores emisores de NOx, en Colombia, son el transporte, con 136.443 toneladas en 1996, el industrial con 48.849 toneladas y el eléctrico con 20.736 durante el mismo año. De nuevo el sector eléctrico presentará el mayor crecimiento pues se espera que a finales de la próxima década las emisiones lleguen a 138.515 toneladas, casi siete veces las que se presentaron durante 1996. Las emisiones de NOx provenientes de los sectores urbano y comercial son despreciables en comparación con las de los demás sectores. Durante 1996 las emisiones de NOx fueron de alrededor de 250 kton para los siete sectores. Se espera que estas aumenten hasta niveles cercanos a las 500 kton en el 2010.

CO: Las emisiones de CO provienen principalmente de los sectores transporte y rural. Las cantidades espera-

das en los demás sectores son bastantes bajas en comparación con estos dos. En 1996 se emitieron un poco más de 2.9 Mton de CO, figura 7 y se espera que éstas aumenten hasta niveles cercanos a 4 Mton para el 2010. De nuevo los principales emisores de este gas serán los sectores transporte y residencial rural. Las emisiones del sector transporte pasan de 1.8 Mton en 1996 a 2.8 Mton en el 2010. Las del sector rural aumentan de 1.1 Mton hasta 1.4 Mton durante todo el periodo en cuestión.

Con respecto a la participación porcentual de estos dos sectores en el total, en 1996 el sector rural era responsable del 39% de las emisiones totales mientras el sector transporte lo era del 59%. La participación del sector rural disminuye hasta el 34% en el 2008 mientras que la del sector transporte aumenta hasta el 64%. Los sectores industrial y transformación contribuyen únicamente con el 2% del total emitido anualmente durante todo el período.

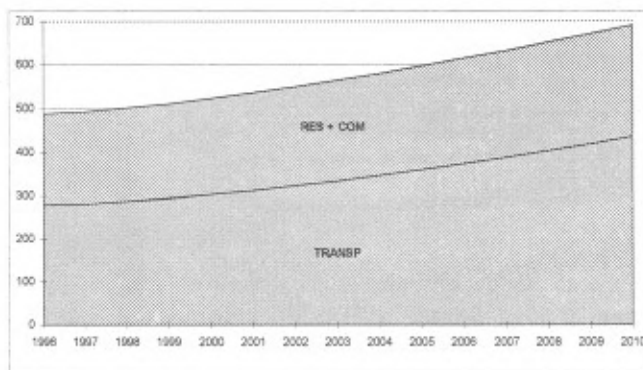


Figura 5. Emisiones de NMVOC por Sectores Económicos (Miles de toneladas anuales)

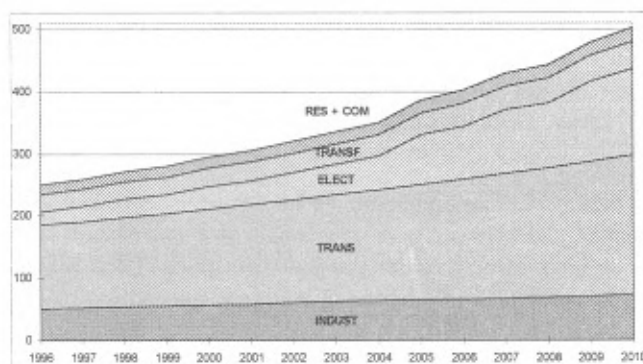


Figura 6. Emisiones de NOx por Sectores Económicos (Miles de toneladas anuales)

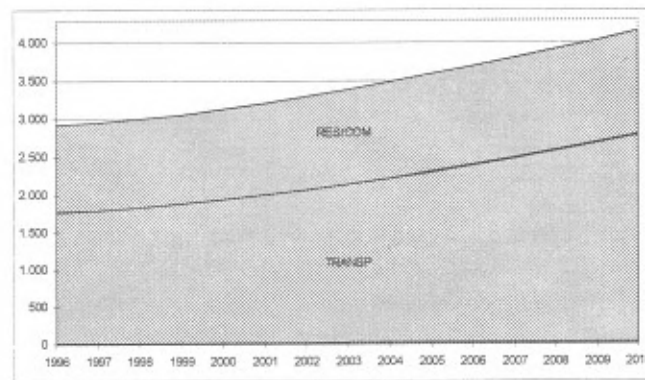


Figura 7. Emisiones de CO por Sectores Económicos (Miles de toneladas anuales)

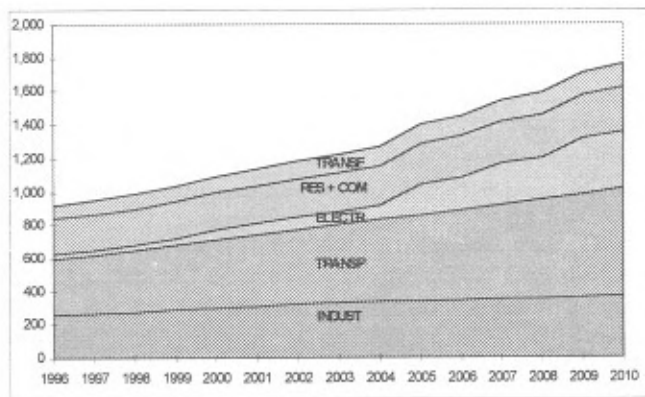


Figura 8. Emisiones de N₂O por Sectores Económicos (Toneladas Anuales)

N₂O: Los sectores comercial, industrial y transporte son las principales fuentes de N₂O. Las emisiones de N₂O ascendieron a casi 920 toneladas en 1996. A finales de la próxima década se espera que las emisiones de este gas se dupliquen y alcancen las 1.800 toneladas.

Se espera que la participación del sector eléctrico en las emisiones totales aumente de 3% en 1996 hasta 16% en el 2010. La participación porcentual del sector transporte permanece constante durante todo el periodo de análisis. Los demás sectores disminuyen su porcentaje del total; el sector residencial/comercial disminuye de 23% en 1996 hasta 17% en el 2008, y el sector industrial lo hace desde el 28% hasta el 22% a finales del periodo de análisis.

Emisiones del sector no-energía

Subsector Forestal

Las emisiones en este subsector provienen de la tala y quema de los bosques deforestados y de la utilización industrial de la madera proveniente en su mayoría de los bosques naturales. La figura 9 muestra la evolución esperada de las emisiones de CO₂ de acuerdo con las suposiciones del caso base.

La captura de CO₂ en este subsector se debe principalmente a la reforestación de protección y a la comercial, así como también la debida a la regeneración de los bosques naturales explotados bajo licencia. De acuerdo con los planes del gobierno mencionados como escenario base, se espera que a partir de 1998 la reforestación por estos conceptos sea de 76.000 ha por año. La figura 10 ilustra el comportamiento de la captura de CO₂ para los próximos 10 años.

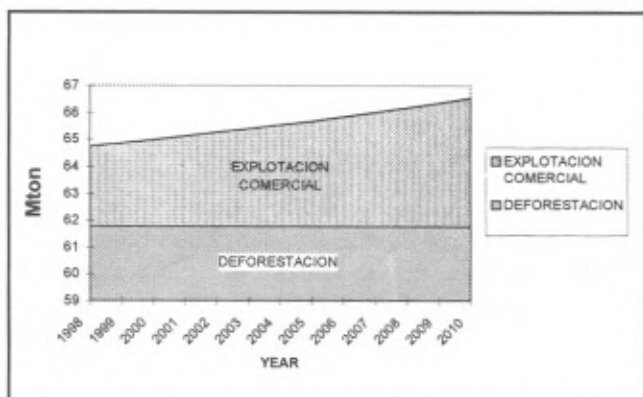


Figura 9. Emisiones de CO₂ para el Sector Forestal - Caso base

Como resultado de la captura de CO₂, las emisiones netas del subsector disminuirán de 60,2 a 48,2 Mton de CO₂ para el año 2010 (figura 11).

Subsector Agrícola

Las emisiones del subsector agropecuario son esencialmente CH₄ y N₂O, y en menor cantidad CO y NO_x. Las emisiones de CO₂ son nulas ya que la metodología IPCC considera que las emisiones de este gas por quema de biomasa están justamente equilibradas por la captura del mismo debido al recrecimiento natural de la vegetación.

Las emisiones de CH₄ en este subsector se estiman, de acuerdo con las suposiciones hechas para el caso base en 1,6 Mton para 1996, 1,8 Mton para el 2002 y 2,0 Mton para el 2008. La fermentación entérica en el ganado lechero y de carne es la fuente principal de estas emisiones y representa el 84.5% del total en 1996 y 87.6% en el año 2008.

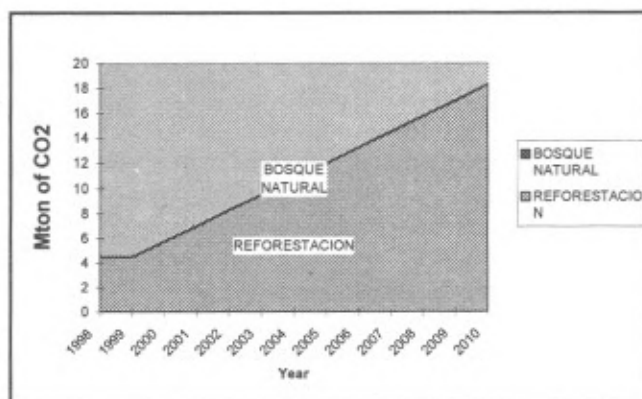


Figura 10. Captura de CO₂ en los bosques - Escenario Base (Mton/año)

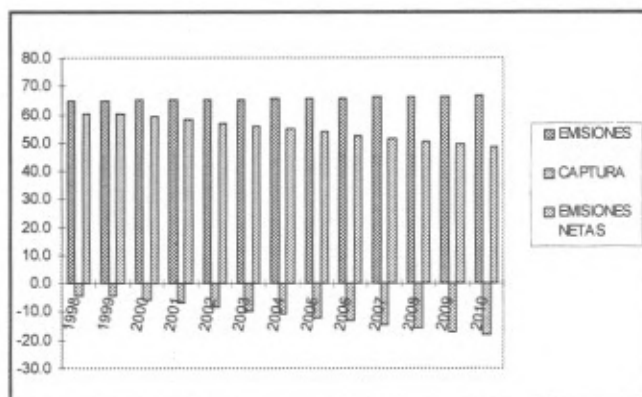


Figura 11. Evolución de las emisiones y captura (Mton/año)

Conclusiones

Emissiones Netas de CO₂

La Figura 12 muestra la evolución del total de las emisiones netas de CO₂ en Colombia para los sectores energía y no-energía (en este caso el sector forestal), y para el periodo 1997 - 2010.

Las emisiones de CO₂ en 1990 fueron de 167 Mton, de las cuales el sector energía fue responsable de aproximadamente el 31% (52.3 Mton) y el sector forestal (tala y quema del bosque) del resto (111.3 Mton). Desde 1990 a 1998 el sector energía ha venido creciendo y sus emisiones aumentando de 52 a 72 millones de ton, mientras que el sector forestal debido a los mayores controles y a los cambios de políticas a nivel nacional al respecto han venido disminuyendo las emisiones de CO₂ desde 111 en 1990 a 60 Mton en 1998. En el período mostrado en la figura 1998 - 2010 las emisiones de CO₂ seguirán disminuyendo en el sector forestal hasta 48 Mton y aumentando en el sector energía hasta 126 Mton en el 2010. El total de emisiones de 1990 (167 Mton) comparado con el total en el 2010 (174 Mton) presenta apenas un aumento de 8 Mton en 20 años. Este escenario podría parecer optimista, pero realmente no lo es, debido a que la cifra de deforestación tomada en el inventario de 1990 siguiendo las directrices de la metodología IPCC es un promedio del período 1970-1990, pero la realidad es que esta cifra desde 1970 viene disminuyendo al punto que en 1990 ya era mucho menor que el promedio. Por esta razón aparece un salto entre 1990 y los años posteriores. En 1998 la tasa de deforestación se asumió como 200.000 ha/año, muy reducida, comparada con 367.000 ha que fue la cifra tomada como el promedio para 1970-1990. Este hecho hace aparecer que las emisio-

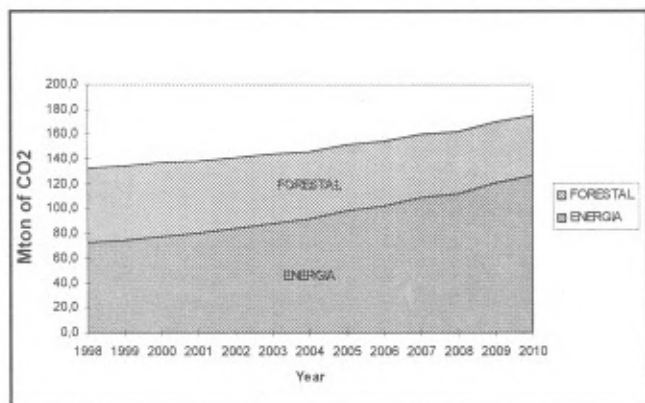


Figura 12. Emisiones Totales de CO₂ (Energía y no-energía) Período 1998 - 2010

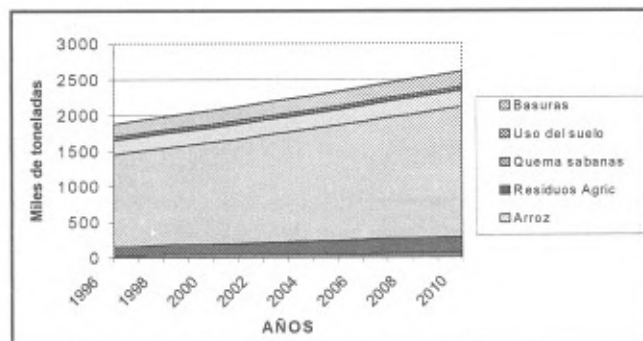


Figura 13. Emisiones Totales de CH₄ por fuente (1996 - 2010)

nes totales casi no aumentan en 20 años sin que se consideren medidas de mitigación diferentes al control sobre la tala del bosque. Las emisiones del sector energía van desde 52 Mton en 1990 a 126 Mton en 2010, aumento compensado con la reducción de la tasa de deforestación en el mismo periodo.

Emisiones Totales de Metano

La figura 13, muestra la evolución del total de las emisiones de CH₄ en Colombia, para todas las categorías fuente de las mismas y para el periodo 1996 - 2010.

La contribución principal proviene de la fermentación entérica, la cual mantendrá su participación porcentual 70% del total al año 2010. Al igual que en el inventario realizado para el año 1990, estas emisiones corresponden en un 95% a la digestión del ganado lechero y de carne. Las fuentes que le siguen en importancia son las emisiones fugitivas en el sector energía, las emisiones por descomposición anaeróbica de las basuras en los rellenos sanitarios y las emisiones causadas por el cultivo del arroz en régimen de inundación.

El crecimiento esperado del total de las emisiones de este gas dentro del escenario base es pequeño, aproximadamente 2.6% anual.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Medio Ambiente y a la Unidad de Planeamiento Minero Energético (UPME) del Ministerio de Minas y Energía, por la información y cooperación prestada. También expresan su gratitud a la Sociedad Alemana de Cooperación Técnica (GTZ) (H. Liptow, B. Boessl, C. Maennling), por la cooperación, asistencia y soporte financiero. Esta gratitud también se hace extensiva a J. Fenhann y A.

Villavicencio del RisØ National Laboratory de Dinamarca, y a M. Cames del Öko Institut de Berlín, por la asistencia técnica prestada.

Referencias

1. **González, F.** 1998. Inventario de Gases de efecto invernadero, Colombia 1990. Academia Colombiana de Ciencias, Colección Jorge Alvarez Lleras 11. Bogotá.
1990; Fuentes y sumideros. Academia Colombiana de Ciencias. Colección Jorge Alvarez Lleras 11. Bogotá
2. **Halsnæs, K., J. Callaway & H. Meyer.** *The Economics of Greenhouse Gas Limitation - Technical Guidelines.* UNEP Collaborating Centre on Energy and Environment. RisØ National Laboratory (February 1998) Roskilde, Denmark.
3. _____, **G. Mackenzie, J.M. Christensen, J. Swisher & A. Villavicencio.** *UNEP Greenhouse Abatement Costing Studies.* UNEP Collaborating Centre on Energy and Environment. RisØ National Laboratory (February 1998) Roskilde, Denmark.
4. **Sathaye, J. & S. Meyers.** 1995. *Greenhouse Gas Mitigation Assessment: A Guidebook.* Kluwer Academic Publishers Dordrecht, Holland
5. **UPME. PEN: Plan Energético Nacional 1997-2010. Autosuficiencia energética sostenible.** UPME (1997) Bogotá
6. **UPME. Plan de Expansión de Referencia 1996-2010. Revisión 1996** UPME (1996) Bogotá
7. **UPME. Balances Energéticos Consolidados 1975-1996. Revisión 1997.** UPME (1997) Bogotá
8. **IAEA-ANL. ENPEP: Energy and Power Evaluation Program**
9. **Plan de Expansión de Referencia Generación - Transmisión 1996 - 2010,** UPME, 1996.
10. **SIEF. Sistema de Información Estadística Forestal. (1998).** Ministerio del Medio Ambiente. Reporte de Trabajo. Bogotá
11. **MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE.** Plan Estratégico para la Restauración y el Establecimiento de Bosques en Colombia (Plan Verde). Dirección General de Ecosistemas (1988) Bogotá.
12. **IPCC/OECD/IEA.** Greenhouse Gas Inventory Reference Manual - First Draft. Volume 1. Bracknell. (1996) U.K.
13. **US - EPA.** *Compilation of Air Pollutant Emission Factors. AP-42.* Fifth Edition. Washington (1996) USA.

OPCIONES PARA LA REDUCCION DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI), COLOMBIA 1998-2010

por

Humberto Rodríguez M.* & Fabio González B.**

Resumen

Rodríguez M. H. & F. González B.: Opciones para la reducción de emisiones de gases de efecto de invernadero (GEI), Colombia 1998-2010. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **23**(89): 507-515, 1999. ISSN 0370-3908.

A partir de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Colombia y su proyección al año 2010, se evaluaron desde el punto de vista técnico y económico diferentes opciones para la reducción de emisiones de los sectores energía y no-energía. Se encontraron 24 opciones con un potencial total de reducción de 31.7 Mton/año de CO₂ equivalente. De estas se destacan las opciones del sector forestal, las cuales representan más del 75% de este potencial. El restante 25% se tiene en proyectos del sector energía. De desarrollarse estas opciones, no solamente se alcanzarían las emisiones del año 90 sino que éstas se reducirían aun en 14%.

Palabras clave: Reducción de Emisiones, Gases de efecto invernadero, Colombia, Opciones, Mitigación

Abstract

Taking into account the Greenhouse Gas Emissions for Colombia in year 2010, different options for reduction of GHG emissions were considered. Twenty-four options were evaluated from economical and technical points of view, with a total reduction potential of 31.7 Mton/year of CO₂ equivalent. About 75% of this potential could be developed in the forestry sector and 25% in energy projects. If the proposed measures can to be implemented, the country's emissions will be 143.5 Mton/year of CO₂ by 2010; this means that Colombia will have lowered its emissions not only to the 1990 level but down to 14% below this level.

Key words: Emissions Reduction, Greenhouse Gas Emissions, Colombia, Mitigation Options.

* Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá, D.C., email: hrodrig@colciencias.gov.co

** Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá, D.C., email: fgonzal@ciencias.ciencias.unal.edu.co

Introducción

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, en inglés: UNFCCC) suscrita por 155 países en Río de Janeiro, Brasil, en 1992, tiene como objetivo la "estabilización de las concentraciones de los Gases de Efecto de Invernadero (GEI) en la atmósfera a un nivel tal que se puedan evitar interferencias antropogénicas peligrosas para el sistema climático" (Artículo 2). Las directrices para alcanzar esta meta incluyen que todos los países que suscribieron el convenio "deberían proteger el sistema climático para el beneficio de las generaciones presentes y futuras de la humanidad sobre la base de la equidad y de acuerdo con sus responsabilidades comunes pero diferenciadas, y su respectiva capacidad", y que "las Partes deberían tomar medidas preventivas para anticipar, prevenir o minimizar las causas del cambio climático y mitigar sus efectos adversos" (Art. 3).

Colombia adoptó la CMNUCC el 09 de Mayo de 1992 y el Congreso Nacional la aprobó por Ley 164 de 1995. La Corte Suprema de Justicia la consideró exequible y fue ratificada el 22 de Marzo 1995. Entró en vigencia para el país el 20 de Junio de 1995. Como país no perteneciente al Anexo I tiene los compromisos generales establecidos para todos las naciones que suscribieron las CMNUCC:

- Desarrollar, actualizar periódicamente, publicar y ofrecer a la conferencia de las Partes los Inventarios Nacionales de Emisiones antropogénicas de todos los GEI no controlados por el protocolo de Montreal.
- Emplear la metodología IPCC para su elaboración.
- Formular, implantar, publicar y actualizar regularmente programas nacionales que contengan medidas para mitigar el cambio climático mediante el tratamiento de las emisiones antropogénicas.

Los países industrializados del Anexo 1 están comprometidos a suministrar recursos financieros para asistir a los países en desarrollo en la preparación de sus comunicaciones nacionales y a transferir tecnología para que los países en desarrollo puedan cumplir con la implementación de sus programas de reducción de emisiones. Dentro de este contexto, la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN), con el apoyo de la Sociedad Alemana de Cooperación Técnica (GTZ) y el aval del Ministerio de Medio Ambiente, realizó durante 1995 y 1996 el *Inventario de Gases de Efecto Invernadero - Colombia 1990*¹. Como con-

tinuación de este estudio, la ACCEFYN (nuevamente con el apoyo de la GTZ) realizó durante 1998 el presente estudio *Opciones para la Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Colombia 1998-2010*, dentro del cual se realizó una proyección de estas emisiones al año 2010². Este estudio se realizó siguiendo las guías metodológicas desarrolladas por la UNEP^{3,4} y el US Country Studies Programm⁵. El propósito de adoptar metodologías internacionalmente aceptadas es facilitar la comparación de los resultados entre países.

Este artículo presenta los resultados encontrados para el caso colombiano y algunos lineamientos generales para la formulación de un Plan Nacional de Reducción de Emisiones de GEI para Colombia*.

Opciones de reducción de emisiones

La opción de reducción de emisiones consiste en sustituir la tecnología actual por una de las nuevas tecnologías** o en introducir nuevas tecnologías en vez de las convencionales. La evaluación de cada una de las nuevas tecnologías conlleva un análisis técnico económico y ambiental, en el cual se comparan económica y ambientalmente dos opciones tecnológicas que suministran la misma cantidad de energía o prestan el mismo servicio con el mismo grado de confiabilidad.

El análisis de costos^{1,2} considera la vida útil del proyecto, los costos de inversión, O&M, y el costo de los combustibles a emplear para cada una de las opciones (costos en US\$). Todos estos costos se llevan a una anualidad en VPN (Valor Presente Neto) y se calcula el costo total anual tanto de la opción de referencia (a sustituir u opción convencional) como de la opción de reducción de emisiones. Para estimar este VPN, se parte de la vida útil del proyecto con una tasa de descuento del 10% anual.

La comparación económica entre las dos opciones se hace calculando el incremento en los costos como la diferencia entre los de la opción de reducción y los de la

* La tarea de la formulación de planes de esta naturaleza y su desarrollo corresponde al Ministerio de Medio Ambiente, Ministerio de Minas y Energía, Ministerio de Agricultura y Ministerio de Desarrollo, junto con el Departamento Nacional de Planeación, entre otros. Por lo tanto, la propuesta presentada por la ACCEFYN no pretende sustituir las tareas de las instituciones del estado Colombiano sino que intenta constituirse en un aporte de la comunidad científico-técnica del país a la discusión de tan importante problemática.

** Estas nuevas tecnologías utilizan la energía de manera más eficiente y racional y por lo tanto disminuyen las emisiones de GEI, ya sea por que usan menos energía o por que los productos residuales de la combustión son menores.

opción de referencia. Un incremento negativo significa que la opción de reducción propuesta es económicamente más ventajosa que la opción de referencia.

Paralelamente se calculan las emisiones de GEI de la opción de referencia y las de la opción de reducción. Las emisiones de CO₂, N₂O y CH₄ en toneladas por año se calculan empleando los factores de emisión de la metodología del IPCC de 1996 y el consumo de combustibles para cada opción. Luego, todas estas emisiones se reducen a emisiones equivalentes de CO₂. Las dos emisiones se comparan calculando la reducción como la resta entre las emisiones de la opción de referencia menos las de la opción de reducción. Una reducción positiva indica que la nueva opción reduce las emisiones de GEI a la atmósfera. Un indicador para valorar la bondad (costo / beneficio) de una opción de reducción de emisiones es el cociente entre el incremento de costos para la opción de reducción y la reducción de las emisiones en equivalente de CO₂. La unidad de este índice es US\$/t de CO₂ equivalente.

Este índice de costo-beneficio puede resultar negativo, cero o positivo. Un índice negativo significa que la opción es ventajosa económicamente y además reduce emisiones de GEI. Puesto que es viable económicamente, esta opción denominada en inglés "non regret", ya debería haberse implementado puesto que ya están dadas las condiciones económicas para su ejecución. Un índice positivo indica que la opción no es económicamente ventajosa y su implementación dependerá finalmente de un apoyo económico justificado por las ventajas medioambientales y/o por las condiciones muy particulares de la aplicación.

De manera similar se evalúan las opciones de mitigación para el sector no-energía. En este caso la opción de referencia es dejar las cosas tal como están y las opciones de mitigación están relacionadas con el mejoramiento y ampliación de los sumideros de CO₂ (forestación y reforestación) y con la protección de los depósitos actuales (protección de los bosques naturales, programas de desarrollo sostenible). En este caso también se pueden encontrar opciones con indicador negativo.

Para el caso colombiano, el escenario de penetración de cada tecnología se hizo teniendo en cuenta estudios de determinación del potencial de la tecnología (p.e. cogeneración^{6, 7}), las demandas de potenciales de equipos (p.e. iluminación⁸), etc. Para la selección de las opciones en el campo de la silvicultura, se partió del conocimiento de experiencias exitosas (por más de 15 años) en reforestación y sistemas silvopastoriles que pueden ser establecidos en regiones que ofrecen posibilidad de desarrollo.

En el análisis de las opciones de reducción de emisiones en energía fue preciso elaborar un Mix de generación en potencia y en energía. El objetivo del mix de energía es estimar los costos promedios de los equipos de generación de energía futuros y las emisiones promedio correspondientes a la ampliación del sistema de generación en el periodo 2000-2010. La tabla 1 muestra la estructura de la potencia del sector generación de electricidad del país hasta 1996, las adiciones realizadas en el periodo 1996-2000, y las adiciones proyectadas de acuerdo a los escenarios LP1 a LP4, y el total al año 2010 para cada escenario. Como puede fácilmente observarse, el sistema de generación colombiano esta haciendo la transición de un costoso sistema basado en la hidroelectricidad (75.6%) en 1996 pero bajo en emisiones, a uno menos intensivo en capital (hidroelectricidad 51.9%) en el 2010 pero más intensivo en emisiones (gas + carbón 48.1%).

Tabla 1. Estructura de Generación del Sector Eléctrico (potencia)

POTENCIA	Hidro	Carbón	Gas	TOTAL		
Hasta 1996	8017	918	1666	10601	MW	Efectivos
1996-2000	732	150	1783	2665	MW	LP1
2001-2010	2531	450	3607	6588	MW	LP1
TOTAL	11280	1518	7056	19854	MW	LP1
2001-2010	2864	1200	2529			LP2
TOTAL	11613	2268	5978	19859		
2001-2010	2014	900	3342			LP3
TOTAL	10763	1968	6791	19522		
2001-2010	1361	1600	3236	6197		LP4
TOTAL	10110	2668	6685	19463		
Participación porcentual						
	Hidro	Carbón	Gas	TOTAL		Escenario
Hasta 1996	75,6%	8,7%	15,7%	100,0%		
1996-2000	66,0%	8,1%	26,0%	100,0%		
Final 2010	56,8%	7,6%	35,5%	100,0%		LP1
Final 2010	58,5%	11,4%	30,1%	100,0%		LP2
Final 2010	55,1%	10,1%	34,8%	100,0%		LP3
Final 2010	51,9%	13,7%	34,3%	100,0%		LP4

En términos de energía, las opciones de reducción de emisiones deben ser comparadas sobre la base de los costos y las emisiones correspondientes al escenario seleccionado, LP4. En la Tabla 2 se observa que el 57.2% de la energía que generará la adición LP4 provendrá de centrales a gas, 27% de centrales a carbón y solamente, 15.7% de centrales hidroeléctricas. La consecuencia inmediata es que los costos de capital decrecen de US\$1300/kW instalado en un sistema 100% hidroeléctrico a US\$836/kW instalado en el mix LP4 pero las emisiones aumentan.

Tabla 2. Descripción del Mix para Colombia 2001-2010

Inversión	836 US\$/kW			Tiempo de vida	20 Años
Factor de capacidad	7488 Horas			Eficiencia promedio	0,433
Pérdidas	12%			Operación y mantenimiento	3,0%
	Hidroelectricidad	Carbón	Gas natural		
Inversión	1300	1200	460		US\$/kW
Tiempo de vida	20	20	20		Años
Factor de capacidad	5361,79	7841,25	8207,97		horas
Eficiencia promedio	95%	33%	34%		
Pérdidas	12%	12%	12%		
Operación y mantenimiento	1,50%	1,50%	1,50%		
Energía total generada	46404	GWh/año			
Participación porcentual	15,7%	27,0%	57,2%		100%
Energía anual generada	7297	12546	26561		GWh/año
Potencia total instalada	6197	MW			
Participación porcentual	22,0%	25,8%	52,2%		100%
Potencia instalada	1361	1600	3236		MW

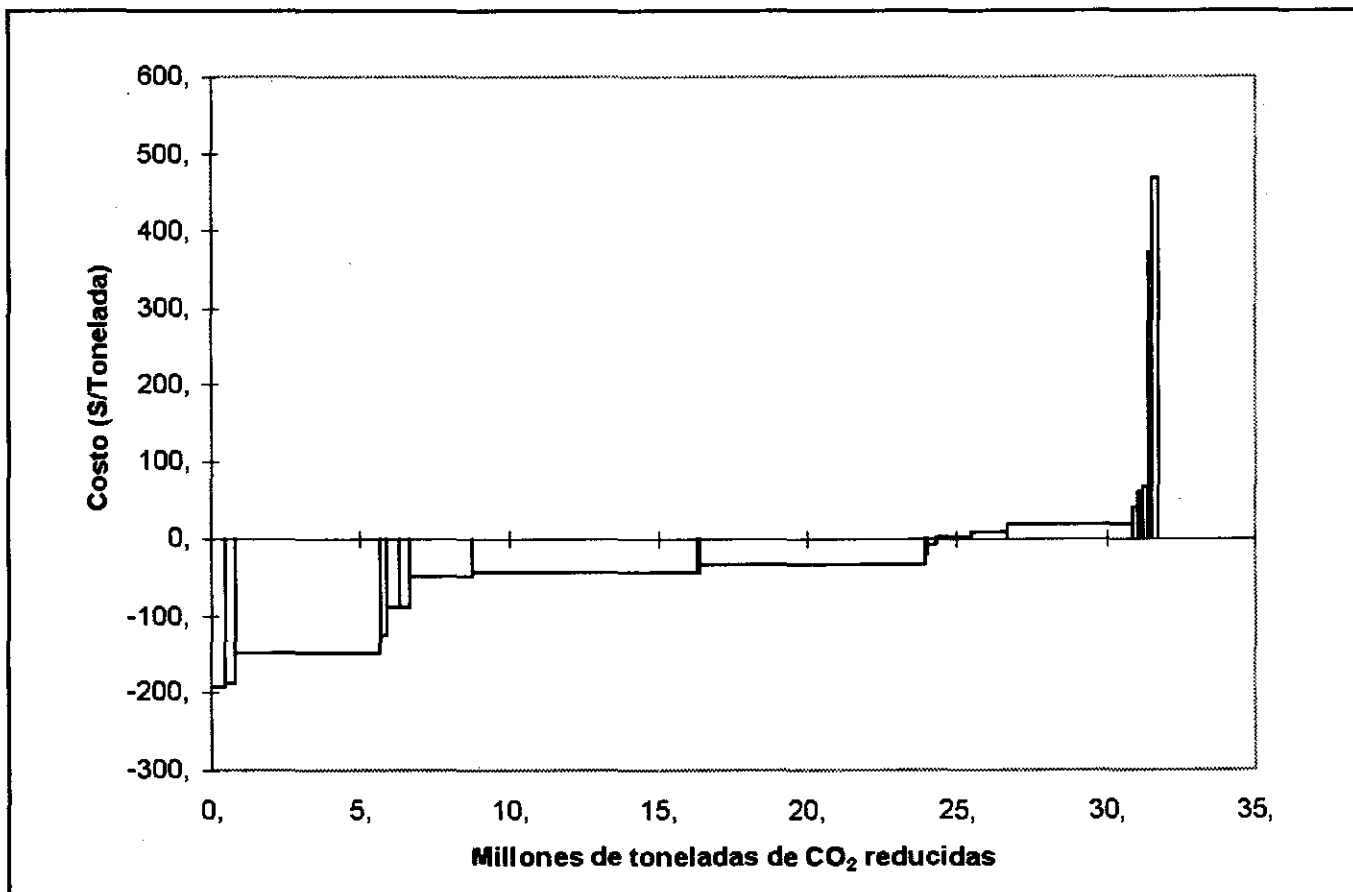


TABLA 3. ESCENARIO DE MITIGACION

Reduction option	US\$/tonCO2	Unit Type	Emission reduction t CO2/unit	Units penetrating in 2010	Reduction in 2010 Mill.t/year	Cumulative Reduc. 2010 Mill. t/year	Reduction in 2010
Cogeneration (1 MW)	-193	1 MW	1235	400	0,49	0,49	0,28%
Efficient lighting	-188	Bulb	0,03	10.000.000	0,33	0,83	0,47%
TECA-Afforestation	-149	14 ha	161	30.000	4,84	5,67	3,25%
Ethanol blend	-124	Plant	43542	5	0,22	5,89	3,37%
Gastrucks	-88	1 Small truck	16	26.910	0,43	6,31	3,61%
Gasbuses	-88	1 Bus	16	22.425	0,35	6,67	3,82%
Efficient boilers	-49	1 Boiler	4164	500	2,08	8,75	5,01%
Pine Afforestation	-42	14 ha	252	30.000	7,56	16,31	9,34%
Timer to DWH	-42	DWH with timer	0	200.000	0,08	16,39	9,39%
Eucalipto Afforestation	-32	14 ha	252	30.000	7,56	23,95	13,72%
Methane from sewage	-28	Plant	966	10	0,01	23,96	13,72%
Hydro Vs. CC	-20	MW	52	1.361	0,07	24,03	13,76%
Gastaxies	-9	1 Taxi	4	65.665	0,23	24,26	13,89%
Efficient motors	-7	kW	3	14.000	0,05	24,31	13,92%
Biogas from landfills	3	Landfill	381261	3	1,14	25,46	14,58%
Minihydro power	8	kW	6	200.000	1,24	26,70	15,29%
Protector reforestation	18	1 ha	18	231.000	4,20	30,90	17,69%
Wind turbines	41	kW	1	100.000	0,15	31,05	17,78%
Biogas for rural househ	59	Digesters	7	5.000	0,04	31,08	17,80%
Solarheater	60	Solarheater	2	100.000	0,15	31,24	17,89%
Microhydro	67	kW	1	1.000	0,15	31,39	17,97%
Close Cicle	371	MW	73	1.500	0,11	31,50	18,04%
PV electricity 1	428	kW	1	20.000	0,02	31,52	18,05%
Combined Cicle	469	MW	75	3.000	0,22	31,74	18,18%

Number Options: 24

Total Emissions in 2010:

174,63 Million tonnes

Con las tecnologías seleccionadas y teniendo en cuenta su penetración hasta el año 2010, se desarrolló con la asistencia de Riso y el software GACMO de la UNEP⁹ un escenario con 24 opciones de reducción de emisiones. Estas opciones se ordenan de acuerdo a su índice costo-beneficio. La tabla 3 resume los resultados del escenario de reducción de emisiones construido para el caso colombiano y la figura 1 presenta la curva de costos marginales correspondiente.

En este escenario, el potencial total de reducción de emisiones al año 2010 es de 31.7 Mton de CO₂. De las 24 opciones, catorce de ellas presentan un valor negativo para el índice costo-beneficio. Este valor negativo indica que se trata de una opción que es actualmente ventajosa económicamente y que además de ello, tiene el beneficio ambiental de la reducción de emisiones. Entre estas opciones se destacan las del sector forestal, las cuales son las que tienen mayor impacto en la reducción de emisiones pues representan aproximadamente 24 Mton al año 2010, es decir, más del 75% del total de las reducciones. El restante 25% del potencial de reducciones se da en el sector energía.

Las diez opciones restantes son de indicador positivo y corresponden a aplicaciones de «fuentes de energía alternativas» y a la opción «Reforestación de Protección».

Las opciones de reforestación corresponden a tres tipos de proyectos, a saber:

1. **Reforestación de protección.** Se trata de reforestar en áreas de protección de acuíferos o en regiones inhabitadas, tal como alta montaña. Los costos de esta opción tienen que ver con la compra del terreno y con los costos asociados a la siembra y el mantenimiento durante los primeros cuatro años, después de lo cual se abandona el bosque. Esta opción resulta de costo unitario positivo.
2. **Reforestación con aprovechamiento comercial.** Se trata de proyectos modulados a 14 hectáreas en regiones deprimidas del país (llanos orientales o costa atlántica). Estos proyectos dan empleo a una familia por módulo. 3 ha se emplean para el mantenimiento de la familia. Las restantes 11 ha se reforestan con *Pinus Caribea*. La madera resultante se explota comercialmente con un período de rotación de 15 años. Estos proyectos resultan con costo unitario negativo, dado que lo invertido se recupera con la venta de la madera al final del período de rotación.
3. **Reforestación con ganadería y aprovechamiento comercial.** Se trata de pequeños proyectos modulares de 14 ha, familiares como el anterior,

en los cuales además de la explotación comercial de la madera existe ganadería, 21 reses por proyecto, el cual resulta viable por el tipo de especie de reforestación (Eucalipto, con rotación de 8 años y TECA con período de rotación de 20 años). Estos proyectos resultan con costo unitario negativo porque además de la venta de madera al final del período de rotación, se tiene la venta de ganado cada 2 años a partir del cuarto año.

El potencial de las opciones de reforestación resulta muy bondadoso 24 Mton/año, pensando en involucrar a 90.000 familias en los proyectos de tipo 2 y 3. Este escenario es optimista en el sentido de que se considera que todo el CO₂ capturado en los bosques plantados en forma de madera se conservará por largo tiempo, a pesar de que se explote comercialmente.

En el sector energía resultan 10 opciones de reducción de emisiones con un potencial de apenas 7.7 Mton/año. Este potencial es reducido debido a que la componente hidroeléctrica en el sistema actual es muy alta (76% en potencia en 1996) y en el año 2010 a pesar de las adiciones del escenario LP4, el sistema seguirá siendo bajo en emisiones como corresponde a un sistema con el 52% de la potencia de origen hidroeléctrico.

Dentro de la perspectiva del caso base de emisiones al año 2010, la reducción de 31.7 Mton de CO₂ correspondería a aproximadamente el 20% de las emisiones esperadas para esa época, de aproximadamente 174 Mton. En el caso de que se lograran desarrollar las medidas propuestas, las emisiones del país serían de 143.5 Mton de CO₂, las cuales comparadas con las emisiones del año de 1990 de 167 Mton de CO₂, significaría que no solamente se habría alcanzado el nivel de emisiones del año 1990 sino que además el país reduciría sus emisiones en un 14% con relación a este año.

Si de las opciones propuestas solo se desarrollaran las correspondientes al sector energía, las emisiones netas al año 2010 serían de 166 Mton, retornando al nivel de emisiones correspondientes al año 1990.

Comparado este escenario de reducción de emisiones con los escenarios de otros países como Senegal, Venezuela, Tailandia, Zimbabue y Brasil¹, el escenario de mitigación para el caso colombiano arroja reducciones totales comparables a las de estos países, pero a diferencia de ellos, en Colombia se tienen opciones de mitigación supremamente ventajosas económicamente y acordes con las principales tendencias políticas del gobierno hacia el sector agropecuario y silvicultural, y al desarrollo de sus programas de eficiencia energética.

Impacto macroeconómico de las opciones de reducción de emisiones

Colombia es un país de ingreso medio bajo, cuyo desempeño económico en el largo plazo ha sido promedio en el contexto latinoamericano, pero que en los últimos años ha registrado señales de deterioro económico. Ha pasado de crecer a más del 5.0% entre 1993-95 a sólo 2.8% en 1998 y se prevé que en 1999 lo hará a 2.0%. Sólo a partir del año 2000 se espera una recuperación de la economía, registrándose en el 2002 niveles de crecimiento superiores al 5.0%. En los noventa, el sector primario redujo significativamente su crecimiento, el sector industrial no ha registrado el dinamismo esperado, mientras que el sector terciario ha crecido.

Colombia registra en la década de los noventa un dramático incremento del desempleo. Este ascendió a 15.1% en septiembre de 1998. Los más afectados son los grupos menos educados y los menos favorecidos de la población. El panorama laboral no es alentador en la actualidad, a raíz de la crisis fiscal, debido a que los sectores dinámicos no han podido absorber a los desempleados y debido a factores de tipo estructural del mercado laboral.

En los noventa, continúan habiendo en el país una marcada desigualdad en la distribución del ingreso (Gini: 0.47), una alta inequidad y niveles alarmantes de pobreza: 55.0% de la población se encuentra debajo de la línea de pobreza y 20.0% incluso por debajo de la línea de indigencia.

La cuenta corriente de la balanza de pagos se ha deteriorado, pasando de un superávit de 5.5% del PIB en 1991 a un déficit de 6.6% en 1998. Se pretende reducirlo a 3.5% del PIB en el año 2002. Este se debe a un creciente déficit comercial, transferencias netas menores y una balanza de servicios crecientemente negativa desde 1995. La balanza comercial pasó de un superávit de 7.0% del PIB en 1991 a un déficit de 3.8% en 1998. Se prevé reducirlo a 0.2% del PIB para el año 2002. La cuenta de capital registró un creciente superávit entre 1992-96, alcanzando un 8.3% del PIB, el cual se redujo entre 1997-98 a 4.8%. En 1999 aumentará a 6.2% del PIB y se reducirá hasta el año 2002 a 4.0%.

El déficit fiscal también se ha ahondado en los noventa. Gran parte del problema es atribuible al Gobierno Central, y particularmente a sus gastos corrientes, especialmente transferencias y servicios personales.

El programa de reducción de emisiones de GEI analizado contempla 24 opciones cuyos costos se presentan de

forma resumida en la tabla 4. El total es de Millones US\$24.226 mientras que la opción de referencia tan solo es de Millones US\$1.623. Esta diferencia se debe a que la mayor parte de los proyectos son nuevos y corresponden principalmente a proyectos extensivos de reforestación (Millones US\$19.756 o sea el 81.5%). Las otras opciones representan la introducción de nuevas tecnologías vs “dejar que las cosas continúen igual” (“business as usual”; costo de referencia 0). Frente a esta opción, las opciones de nuevas tecnologías propuestas representan un incremento en la inversión de Millones US\$4.470. Resalta la existencia de múltiples opciones con un alto componente nacional, en particular de las opciones de mitigación, basadas en reforestación con teca (*Tectona Grandis*) pino, eucalipto y la reforestación de protección. Una primera estimación permite establecer que estos proyectos generarían en los períodos considerados alrededor de 186,600 empleos directos y su componente nacional sería de 100%. Los proyectos de nuevas tecnologías tienen poca componente nacional y no generan muchos empleos directos frente a las opciones forestales.

La realización del total de proyectos implicaría un costo estimado de alrededor 2.0-2.5% del PIB anualmente.

El desarrollo de estos proyectos, fundamentalmente de aquellos de reforestación que son los generadores de empleo, es importante de considerar no sólo dentro del contexto ambiental, sino también como alternativa importante para el logro de los objetivos de *Cambio para Construir la Paz*.

De una parte, los proyectos son plenamente consistentes con los propósitos ambientales del Gobierno, por ejemplo con el plan de bosques que pretende avanzar en la restauración y conservación de eco-regiones estratégicas para mejorar la calidad de vida de la población, con la producción limpia y con el objetivo de propender por una mayor calidad de vida urbana. De otra, aún más importante dentro del contexto colombiano, es que varias de las opciones de mitigación de GEI identificadas, podrían contribuir al proceso de paz mediante la inversión y generación de empleo en zonas de conflicto social, aliviando así el problema de migración a las zonas urbanas. Actualmente se está considerando la creación de una bolsa de carbono en donde los países avanzados compran reducción de emisiones de GEI, en razón de los compromisos asumidos a nivel internacional en materia ambiental. Colombia debe considerar la posibilidad de utilizar efectivamente este mecanismo para atraer inversión extranjera al país, contribuir al desarrollo y a un mayor nivel de vida en las zonas más marginadas, a la vez que aporta al objetivo global de preservación del medio ambiente.

Tabla 4. Costos e impactos de las opciones de mitigación

Reduction option	Units penetrating in 2010	Unit Type	Total Investment M US\$	Total Reference M US\$	Increase M US\$	Option - National Share (%)	Option - Imported Share (%)	Option - Direct Job Generation
TECA-Afforestation	30,000	14 ha	8,511	0	8,511	100	0	60,000
Cogeneration (1MW)	400	1 MW plant	212	73	139	30	70	0
Efficient lighting	10	1 million Bulbs	80	40	40	100	0	0
Ethanol blend	5	1 Plant	9	0	9			
Gastrucks	26,910	1 small truck	60	0	60			
Gasbuses	22,425	1 bus	50	0	50			
Efficient boilers	500	1 boiler	49	0	49	10	90	50
Timer to DWH	200,000	1 DWH with timer	8	0	8	25	75	
Pine Afforestation	30,000	14 ha	5,774	0	5,774	100	0	60,000
Eucalipto Afforestation	30,000	14 ha	4,460	0	4,460	100	0	60,000
Hydro vs CC	1,361	MW	2	1	2			
Gastaxies	65,665	1 taxi	146	0	146			
Efficient motors	14,000	kW	6	0	6	90	10	
Methane from sewage	10	1 plant	1	0	1	30	70	
Biogas from landfills	3	1 Landfill plant	44	0	44	30	70	
Minihydro power	200,000	kW	1,386	120	1,266	90	10	
Protector reforestation	231,000	1 ha	711	0	711	100		6,600
Wind turbines	100,000	kW	140	53	87	30	70	
Biogas for rural households	5,000	digesters	13	0	13	100	0	
Solarheater	100,000	Solarheater	100	15	85	70	30	
Microhydro	1,000	kW	3	2	2	90	10	
Close Cycle	1,500	MW	340	0	340	10	90	
PV electricity 1	20,000	kW	180	60	120	50	50	
Combined Cicle	3,000	MW	1,940	1,260	680	10	90	
TOTAL 24			24,226	1,623	22,603			186,650

Conclusiones

El presente estudio muestra que es posible desarrollar en el país proyectos para la reducción de emisiones de GEI con beneficios económicos, sociales y ambientales. Se espera que estas opciones aquí evaluadas sean consideradas por el Ministerio del Medio Ambiente para la formulación de su Plan de Reducción de Emisiones.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Medio Ambiente y a la Unidad de Planeamiento Minero Energético (UPME) del Ministerio de Minas y Energía, por la información y cooperación prestada. También expresan su gratitud a la Sociedad Alemana de Cooperación Técnica (GTZ) (H. Liptow, B. Boessl, C. Maennling), por la cooperación, asistencia y soporte financiero. Esta gratitud también se hace extensiva a J. Fenham y A. Villavicencio del RisØ National Laboratory de Dinamarca, y a M. Cames del Oeko Institut de Berlín, por la asistencia técnica prestada.

Referencias

- 1 **González, F.** 1998. Inventario de Gases de Efecto Invernadero, Colombia 1990. Academia Colombiana de Ciencias. Colección Jorge Alvarez Lleras 11. Bogotá.

- 2 **González, F. & H. Rodríguez,** 1990. *Proyección de la emisiones de GEI Colombia 1998-2010*. Rev. Acad. Colomb. Cinc. 23 (99): 497-505.
- 3 **Halsnæs, K., J. Callaway & H. Meyer.** *The Economics of Greenhouse Gas Limitation - Technical Guidelines*. UNEP Collaborating Centre on Energy and Environment. RisØ National Laboratory (February 1998) Roskilde, Denmark.
- 4 _____, **G. Mackenzie, J.M. Christensen, J. Swisher & A. Villavicencio.** *UNEP Greenhouse Abatement Costing Studies*. UNEP Collaborating Centre on Energy and Environment. RisØ National Laboratory (February 1998) Roskilde, Denmark.
- 5 **Sathaye, J. & S. Meyers.** *Greenhouse Gas Mitigation Assessment: A Guidebook*. Kluwer Academic Publishers (1995) Dórdrecht, Holland.
- 6 **UPME** *Potencial de Cogeneración del Sector Industrial de Colombia*, AENE para UPME, Ministerio de Minas y Energía. (1997) Bogotá, Colombia.
- 7 **UPME** *Potencial de Cogeneración del Sector Terciario de Colombia*, AENE para UPME, Ministerio de Minas y Energía. (1998) Bogotá, Colombia
- 8 **INEA.** *Directiva Ministerial sobre Alumbrado Público*. Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas (1995) Bogotá, Colombia
- 9 **Fenham, J. GACMO.** UNEP Collaborating Centre on Energy and Environment. Risoe Labs. (1998) Roskilde. Dinamarca

LA CORRIENTE DE CHORRO SUPERFICIAL DEL OESTE (“DEL CHOCÓ”) Y OTRAS DOS CORRIENTES DE CHORRO EN COLOMBIA: CLIMATOLOGÍA Y VARIABILIDAD DURANTE LAS FASES DEL ENSO

por

Germán Poveda & Oscar J. Mesa¹

Resumen

Poveda G. & O. J. Mesa: La corriente de Chorro Superficial del Oeste (“del Chocó”) y otras dos corrientes de Chorro en Colombia: climatología y variabilidad durante las fases del ENSO. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 23(89): 517-528. 1999. ISSN 0370-3908.

Usando los datos del Reanálisis Climático de NCEP/NCAR, se estudió la dinámica de tres corrientes que actúan sobre Colombia. Se descubrió una corriente de chorro de bajo nivel proveniente del Pacífico que penetra al interior introduciendo grandes cantidades de humedad (chorro del CHOCÓ). Su intensidad está fuertemente modulada por el ciclo anual, pero su núcleo está localizado en 5°N durante todo el año. El chorro del CHOCÓ contribuye a la advección de humedad por parte de vientos relativamente fríos que interactúan con los vientos más cálidos predominantes (alisios del este), causando alta inestabilidad atmosférica, alta convección profunda y precipitación, normales en la costa del Pacífico. Esta corriente está asociada con la formación de complejos convectivos de meso-escala que penetran desde el Pacífico hacia el interior y que pueden traspasar la Cordillera Oriental, causando alta precipitación. Se explican cuatro causas de origen de la corriente. También se descubrió otra corriente localizada en el ecuador a la altura de los 700-600 hPa, y con un marcado ciclo anual que interactúa con la corriente del CHOCÓ. Además se descubrió que la corriente de chorro superficial de los alisios del mar Caribe hacia los 12°-14°N, acá denominada “corriente de San Andrés”, después de cruzar el istmo centroamericano, retorna hacia el sureste, contribuye a conformar la corriente del oeste del CHOCÓ. Durante El Niño se debilitan fuertemente tanto la corriente del CHOCÓ, como la corriente de los 700 hPa, y la convergencia superficial de vientos sobre Sudamérica tropical; la divergencia de la zona de 700 hPa también se debilita con la disminución de la precipitación. Esto explica, en parte, el déficit de lluvias durante El Niño, y las condiciones opuestas para La Niña.

Palabras clave: ENSO, chorro del Chocó, corriente de San Andrés, Climatología.

¹ Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia e-mail: gpoveda@perseus.unalmed.edu.co.

Abstract

Using data from the NCEP/NCAR Reanalysis Project, we study the dynamics of three jet streams around Colombia. We have found a low-level westerly jet stream off the Pacific coast of Colombia, which constitutes a principal physical mechanism to explain many features of Colombia's climate and hydrology and to explain their anomalies during both phases of El Niño/Southern Oscillation (ENSO). It exhibits a strong annual cycle, yet its core is located around 5°N, throughout the year. The CHOCO jet contributes to moisture advection through relatively cold winds that interact with the predominant warmer easterly trade winds, thus causing high atmospheric instability, strong deep convection and high precipitation amounts along western Colombia. The CHOCO jet is tightly linked to the formation, development and dynamics of meso-scale convective complexes that penetrate from the Pacific inland contributing to high precipitation. Four causes of the origin of the Chocó jet are proposed. Additionally we have identified the existence of another jet stream at 700-600 hPa, also exhibiting a strong annual cycle, that interacts with the CHOCO jet. Also, there is a low-level easterly jet of the trade winds along the Caribbean Sea around 12°-14°N, which recurves just after crossing the Central American isthmus and, returning to the south east, contributes to form the CHOCO jet over the Pacific Ocean. During El Niño there is a weakening of both the CHOCO westerly jet, and of the 700 hPa easterly jet, and of the low-level convergence over tropical South America. The interaction of these observed jet streams help to explaining hydrological (precipitation and river discharges) deficits during El Niño and the observed positive anomalies during La Niña.

Key words: ENSO, Chocó Jet, San Andrés Jet, Climatology.

1. Introducción

El Océano Pacífico ejerce un control muy importante sobre la situación climática de Colombia, en particular del occidente y centro del país. La costa Pacífica de Colombia es una de las regiones más lluviosas del planeta, con precipitaciones sobre tierra entre 8.000 y 13.000 mm en el promedio anual (Snow, 1976, p. 371; Eslava, 1993). La distribución de la precipitación media anual sobre la región tropical de América del Sur no puede ser explicada únicamente en términos de la advección de humedad por los vientos alisios del este, tanto desde el Océano Atlántico como desde la cuenca Amazónica. De particular importancia, el ciclo anual de las lluvias y los mecanismos de circulación que explican las anomalías climáticas durante las dos fases del ENSO tienen principal origen sobre el Océano Pacífico tropical, en las regiones conocidas como Niño-4, Niño-3 y Niño1+2. La influencia del fenómeno ENSO y otros fenómenos oceánicos y atmosféricos de gran escala sobre la hidroclimatología de Colombia y del norte de Sur América ha sido investigada por Poveda & Mesa (1993, 1995, 1996 a y b, 1997), Poveda (1994 a y b, 1996, 1997, 1998), Poveda et al. (1994, 1998), Poveda & Penland (1994), Poveda & Rojas (1996, 1997).

En este trabajo se usan los datos del Proyecto de Reanálisis Climático desarrollado por el *National Center for Environmental Prediction (NCEP)/National Center for*

Atmospheric Research (NCAR), de Estados Unidos (Kalnay et al., 1996) para estudiar la dinámica de la circulación de los vientos alrededor del trópico de Sur América y su variación durante las fases extremas del fenómeno ENSO. En el numeral 2 se presenta la existencia de una corriente de chorro superficial del oeste sobre el Pacífico Colombiano, con énfasis en los mecanismos físicos que la originan. En el numeral 3 se presentan otras dos corrientes de chorro del este: una a la altura de los 700 hPa y la segunda casi superficial hacia los 12° N-14°.

2. La corriente de Chorro superficial del Oeste en el Pacífico Colombiano (Chocó)

La distribución de los vientos alrededor del trópico Americano a la altura de 925 hPa se observa en la Figura 1. La climatología se presenta en la fila superior, y la diferencia entre la situación de fenómeno El Niño (fase caliente del Océano Pacífico) y la fase fría (La Niña) se presenta en la fila inferior; allí los trimestre de marzo-abril-mayo (MAM), JJA y SON corresponden al año 0 del fenómeno ENSO y el trimestre diciembre-enero-febrero (DEF) corresponde al año +1 del fenómeno ENSO. Nótese la circulación de oeste a este sobre el Pacífico oriental en la latitud de Colombia. Estos vientos tienen dirección suroeste-noroeste en el hemisferio Sur y se recurvan la cruzar el Ecuador, pasando a tener dirección suroeste-noroeste en el hemisferio norte. El ciclo anual juega un papel muy importante en la dinámica de estos vientos, ya

que son más intensos durante el período agosto-enero, y alcanzan el máximo en dirección zonal del oeste durante el mes de octubre. Los vientos alisios del noreste que proceden del Mar Caribe también se recurvan y adquieren dirección del oeste al cruzar el istmo centroamericano. Los vientos del oeste que penetran por la costa del Pacífico Colombiano provienen de una corriente de chorro de bajo nivel (muy superficial) del oeste en el trópico. La llamaremos chorro del CHOCÓ (Chorro superficial del Oeste de Colombia, ver Poveda *et al.*, 1998). En la figura 2 se presenta el ciclo anual de la distribución vertical de la componente zonal de la velocidad del viento a los 80°O entre los 5°S y los 15°N, para el período 1982-1994. Se observa que es una corriente de chorro de bajo nivel (hasta los 850 mb) con dirección oeste-este con un ciclo anual muy fuerte, siendo casi imperceptible en los meses de febrero-marzo-abril, intensificándose desde mayo (2 m/s en el núcleo del chorro hacia los 4-5°N y hasta una altura correspondiente a 850 hPa) alcanzando un máximo en octubre-noviembre (más de 6 m/s en el núcleo del chorro), y decreciendo de nuevo hasta el mínimo del mes de febrero. En el análisis trimestral de la velocidad del viento zonal en 80°W (Figura 2), se aprecia en la climatología (fila superior) el marcado ciclo anual de la corriente del CHOCÓ, más intensa durante el trimestre SON, con vientos de más de 6 m/s en el núcleo del chorro hacia los 950 hPa, centrado en 5°N y más débil durante el trimestre MAM, con vientos de 2 m/s, también centrado en 5°N. *Es notable destacar que el núcleo del chorro del CHOCÓ presenta su máxima intensidad en la latitud 5°N, durante todo el año.* Este rasgo merece una explicación física, ya que parecería estar ligado a la topografía de los Andes Colombianos.

La corriente del CHOCÓ es responsable por la fuerte advección de humedad desde el Océano Pacífico hacia el interior de Colombia. Los vientos provenientes del Océano Pacífico, al cruzar la cordillera occidental y descender por su vertiente oriental adquieren carácter de vientos katabáticos (López & Howell, 1967). Los vientos superficiales (más fríos y más densos) provenientes del Océano Pacífico interactúan con los vientos alisios del este sobre la cordilleras occidental y central de Colombia, el cual combinado con el efecto del calentamiento superficial y el ascenso orográfico, produce un perfil atmosférico altamente inestable (Emanuel, 1994, p. 241), que favorece la convección profunda, el ascenso de aire húmedo, altas cantidades de condensación y por tanto alta precipitación a lo largo de la costa occidental de Colombia. En las filas inferiores de las Figuras 1 y 2 se presenta la diferencia entre los eventos de El Niño y La Niña. Se observa que la corriente de chorro del CHOCÓ

se debilita durante El Niño y se intensifica durante La Niña. Esto contribuye a explicar las anomalías hidrológicas en Colombia durante ambas fases del ENSO. ¿Cuales son los mecanismos físicos que regulan la intensidad y la posición de la corriente de chorro del CHOCÓ? La explicación puede darse en términos de la combinación de varios factores, que se estudian a continuación. Ver los detalles en el trabajo de Poveda (1998).

2.1 Recurvatura de los vientos Alisios: Trans-Ecuatoriales y Caribeños. Los vientos que soplan sobre la costa del Océano Pacífico de Sur América cruzan la línea ecuatorial en dirección primordial de sur a norte, asociados con la posición casi permanente de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) al norte del ecuador (Philander *et al.*, 1997). El cruce de hemisferio de los vientos alisios significa un cambio en el signo de la aceleración de Coriolis, que a su vez se refleja en la ecuación que describe la dinámica de los flujos trans-ecuatoriales (Hastenrath, 1991, p.176)

$$\frac{d\bar{V}}{dt} = \bar{V} \cdot \nabla \bar{V} + \overline{V' \cdot \nabla V'} = -f k \times \bar{V} - \bar{\alpha} \nabla \bar{p} - \overline{\alpha' \nabla p'} + \bar{F} \quad (1)$$

en donde las barras denotan promedios en el tiempo, y las primas denotan las desviaciones con respecto a tales promedios, V es el vector velocidad horizontal, F es la fuerza de fricción por unidad de masa, α es el volumen específico, p es la presión, f es el parámetro de Coriolis. La primera componente de la ecuación (1) puede aproximarse como

$$\frac{d\bar{u}}{dt} = \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = +f \bar{v} - \bar{\alpha} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \bar{F}_x \quad (2)$$

Si se supone que la dirección del viento es puramente meridional de sur a norte (no hay componente zonal) donde los vientos cambian de dirección, en la ecuación (2) se termina comparando los términos $v u/$ y (ambos positivos) con el término $f v$ (que también debe ser positivo), y por tanto f debe ser positivo, por lo que la recurvatura tiene que ser en el Hemisferio Norte. Este argumento físico-matemático es válido para explicar la recurvatura de los vientos provenientes del Hemisferio Sur una vez que cruzan la línea ecuatorial, pero no explica la recurvatura (que se convierte casi en un retorno) de los vientos que provienen del mar Caribe y que, una vez que traspasan el istmo Centroamericano, se dirigen hacia el interior de Colombia por la costa Pacífica (ver Figura 1). Esta observación induce a plantear la hipótesis acerca de la recurvatura de los alisios provenientes de los dos Hemisferios sobre la costa Pacífica como resulta-

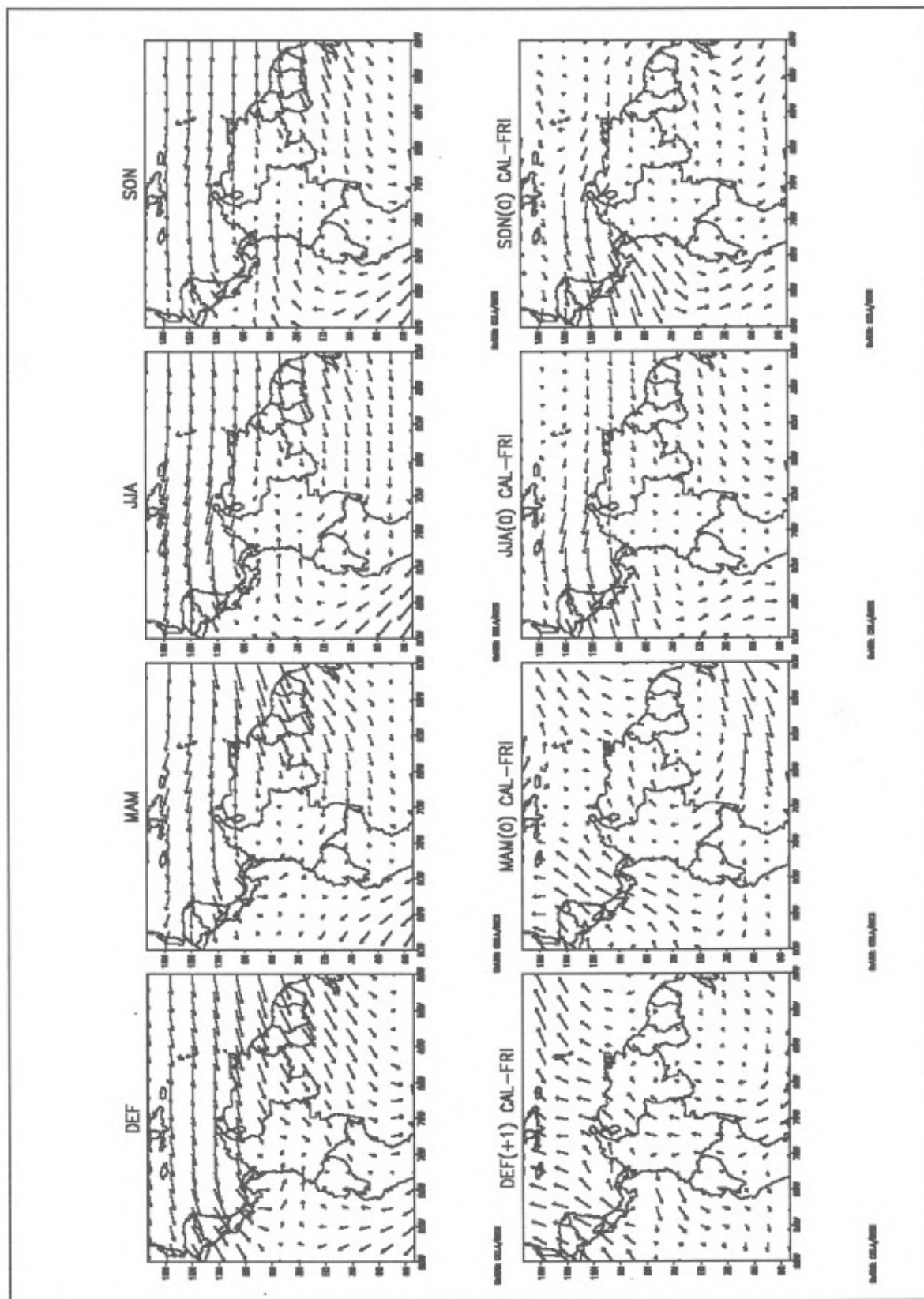


Figura 1. Ciclo anual velocidad de viento 925 mb (m/s) (superior) Diferencia entre eventos cálidos y fríos (inferior)

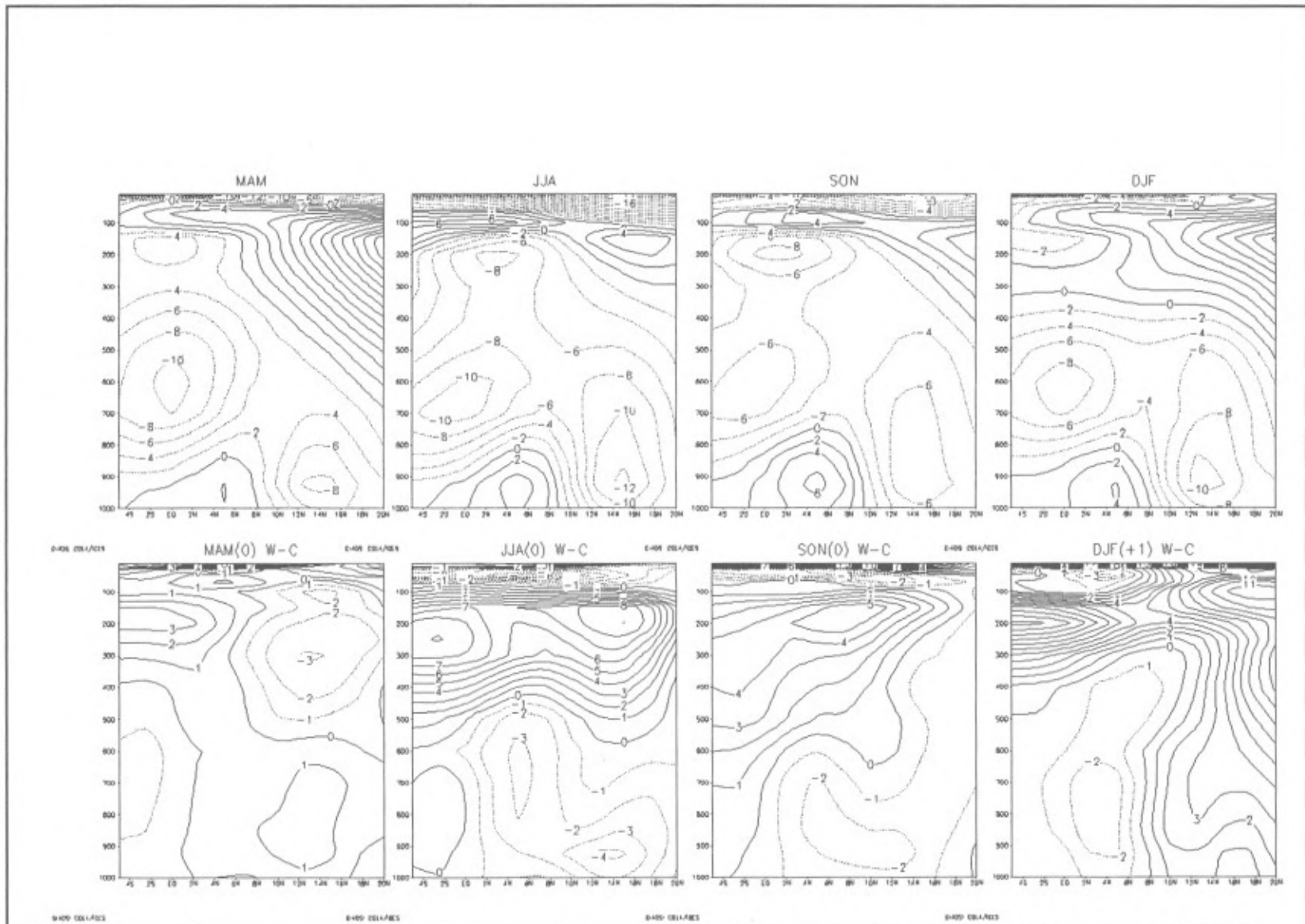


Figura 2. Velocidad de viento zonal por 80W (m/s) (superior) Diferencia entre eventos cálidos y fríos Océano Pacífico (inferior)

do de la convergencia de bajo nivel que se produce en el centro de baja presión cuasi-permanente del Golfo de Panamá, y que por continuidad debe existir consecuentemente con la divergencia de la alta atmósfera, asociada con la región de alta convección y precipitación al occidente de Colombia.

2.2 Gradiente de Temperaturas Tierra-Océano sobre la costa Pacífica. La corriente de chorro superficial del CHOCÓ presenta un claro ciclo anual, que se intensifica en el trimestre septiembre-octubre-noviembre. Se ha examinado el gradiente de temperaturas existente entre tres regiones de interés alrededor de la Costa Pacífica de Colombia, usando los datos del Reanálisis Climático de NCEP/NCAR. En las Figuras 3 a y 3b se presenta el ciclo anual de los gradientes de temperaturas superficiales de Colombia (COLOM: 2°N-8°N; 75°W-77.5°W) y las temperaturas superficiales del Océano Pacífico afuera de las costa Colombiana (PACOL: 2°N-8°N; 77.5°W-82°W), así como para la región Niño1+2 del Océano Pacífico (10°S-0°; 90°W-80°W) para el nivel de 925 hPa. Se observa que el mayor gradiente existe entre la porción de tierra sobre Colombia y las TSM de la región Niño 1-2, siempre levemente superior al gradiente de temperaturas entre las dos regiones oceánicas. El ciclo anual presenta un máximo en el mes de septiembre y un mínimo en el mes de marzo. Estacionalmente, el trimestre septiembre-octubre-noviembre presenta un máximo en el trimestre mayo-junio-julio, presenta un mínimo, coincidiendo con los trimestres de mayor y menor intensidad del chorro del CHOCÓ.

El mayor gradiente de temperatura existente entre tierra y océano en el trimestre septiembre-octubre-noviembre favorece la circulación desde el océano hacia el continente, dado el correspondiente gradiente de presiones atmosféricas que se presenta entre el océano y la atmósfera. El calentamiento diferencial aumenta la energía potencial del sistema continente-océano al establecer una diferencia de presión entre partículas de aire entre uno y otro. El aire que inicialmente está sobre el océano es más frío, y más denso por tanto, que el aire situado sobre el continente. La fuerza generada por el gradiente de presión, que tiende a igualar las diferencias de presión, obliga a que el aire más frío y denso del océano se mueva hacia la tierra, penetrando por debajo del aire caliente situado encima de ésta. Por tanto, el aire caliente se ve forzado a ascender. La precipitación elevada que ocurre sobre la zona libera enormes cantidades de calor latente añadiendo una considerable fuerza a la columna de aire ascendente sobre un continente más caliente. Las partículas de aire ascienden a mayor altura, provocando una mayor reducción de presión sobre la tierra y dando lugar a una

entrada más vigorosa de aire húmedo procedente del Océano Pacífico. Hay una intensificación de una circulación océano-tierra, permanente durante todo el ciclo anual de la climatología, pero que sí se puede reversar durante el ciclo diario. La intensidad del chorro del CHOCÓ está completamente asociada con el ciclo anual del gradiente de temperaturas tierra-océano sobre la costa Pacífica de Colombia.

2.3 Ascenso Orográfico sobre la Cordillera Occidental. La corriente del CHOCÓ se orienta perpendicularmente hacia la cordillera Occidental de los Andes Colombianos. Al encontrar tal barrera, los vientos ascienden por el efecto orográfico que impone la presencia de los Andes y, como se dijo, entran en interacción con los vientos alisios del este que soplan desde el mar Caribe o desde la cuenca del Amazonas. El ascenso de gran cantidad de humedad y la presencia de un proceso acelerado de convección profunda dan origen a la gran cantidad de precipitación de la costa Pacífica de Colombia. De ahí la alta divergencia de vientos que se presenta en la alta atmósfera sobre la región, según resultados del Reanálisis de NCEP/NCAR (no mostrados aquí).

2.4 Complejos Convectivos de Meso-escala. La existencia de la corriente de chorro del CHOCÓ es uno de los mecanismos fundamentales para explicar la existencia de Complejos Convectivos de Meso-Escala sobre Colombia. En diversas partes del mundo se ha encontrado que existe una estrecha relación entre la actividad de corrientes de chorro superficiales con una intensa actividad de convección profunda, y en particular con el desarrollo y evolución de CCM (Stensrud, 1996) tal como ocurre sobre la costa Pacífica de Colombia. Tanto los CCM como las corrientes de chorro superficiales tienen un fuerte ciclo diario. Allí está la fuente de aire frío que favorece la formación de frentes de brisas marinas con un ciclo diario muy marcado (Meisner & Arkin, 1987; Janowiak et al., 1994). Se le ha dado el nombre de "Chocosana" al frente diario de humedad que se desplaza sobre la región del Darién (Arnett & Steadman, 1970). Allí se forman complejos convectivos de meso-escala, (CCM) los cuales penetran al interior del país por la costa Pacífica, yendo muchas veces más allá de la cordillera oriental (López & Howell, 1967; Velasco & Frisch, 1987).

3. Dos corrientes de Chorro del Este en Suramérica Tropical: de los 700-600 hpa y superficial de San Andrés

El análisis de la distribución vertical de los vientos zonales muestra (Figuras 4 y 5) que en la climatología

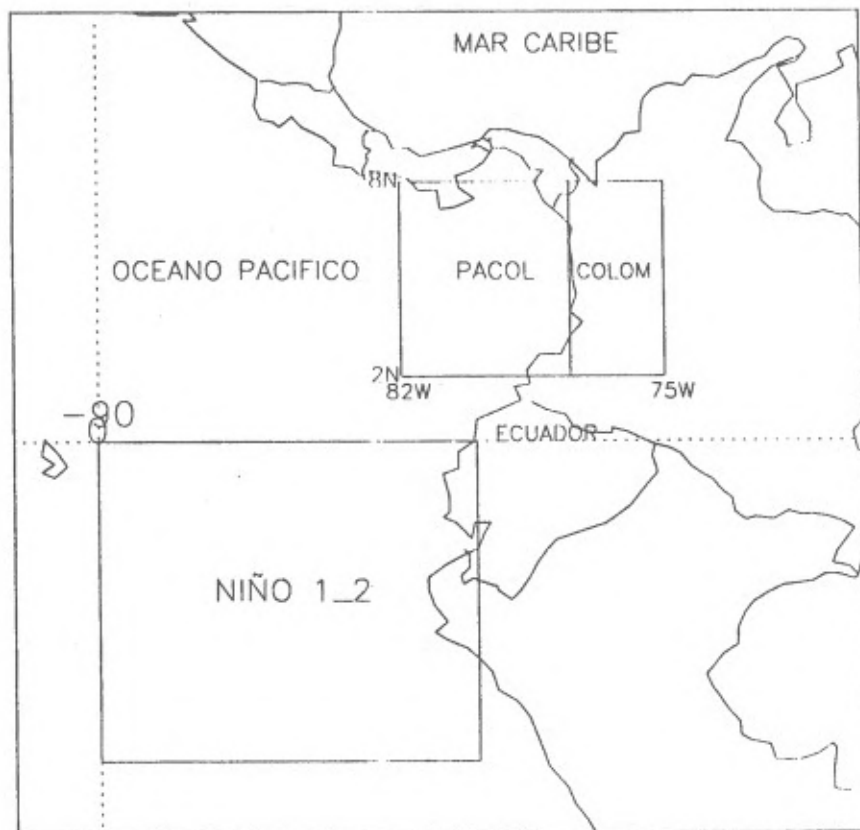
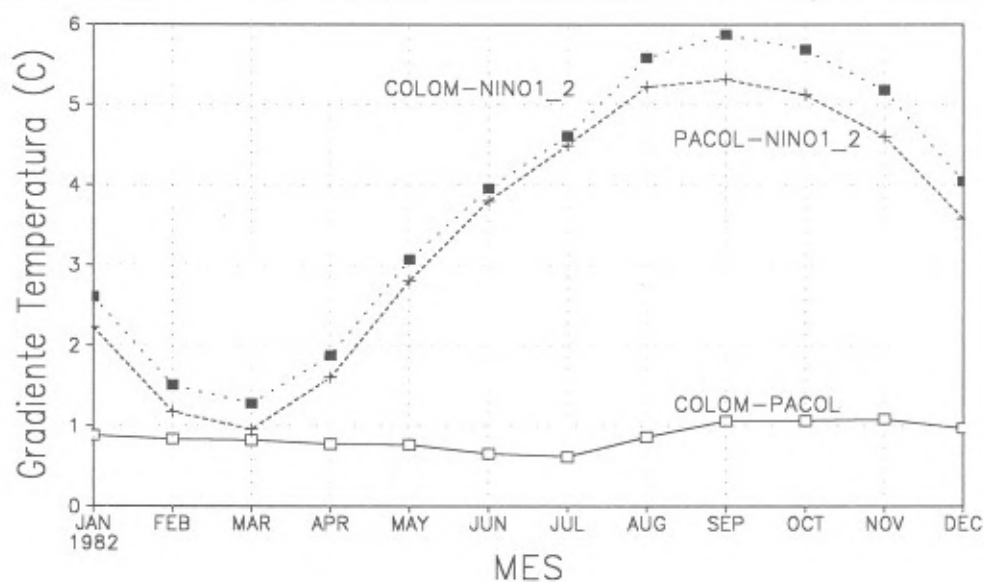


Figura 3a.



GrADS: COLA/IGES

Figura 3b. Ciclo anual de los gradientes de temperaturas superficiales de Colombia (COLOM: 2°N-8°N; 75°W-77.5°W) y las temperaturas superficiales del Océano Pacífico afuera de las costas Colombianas (PACOL: 2°N-8°N; 77.5°W-82°W), así como para la región Niño 1+2 del Océano Pacífico (10°S-0°; 90°W-80°W) para el nivel de 925 hPa.

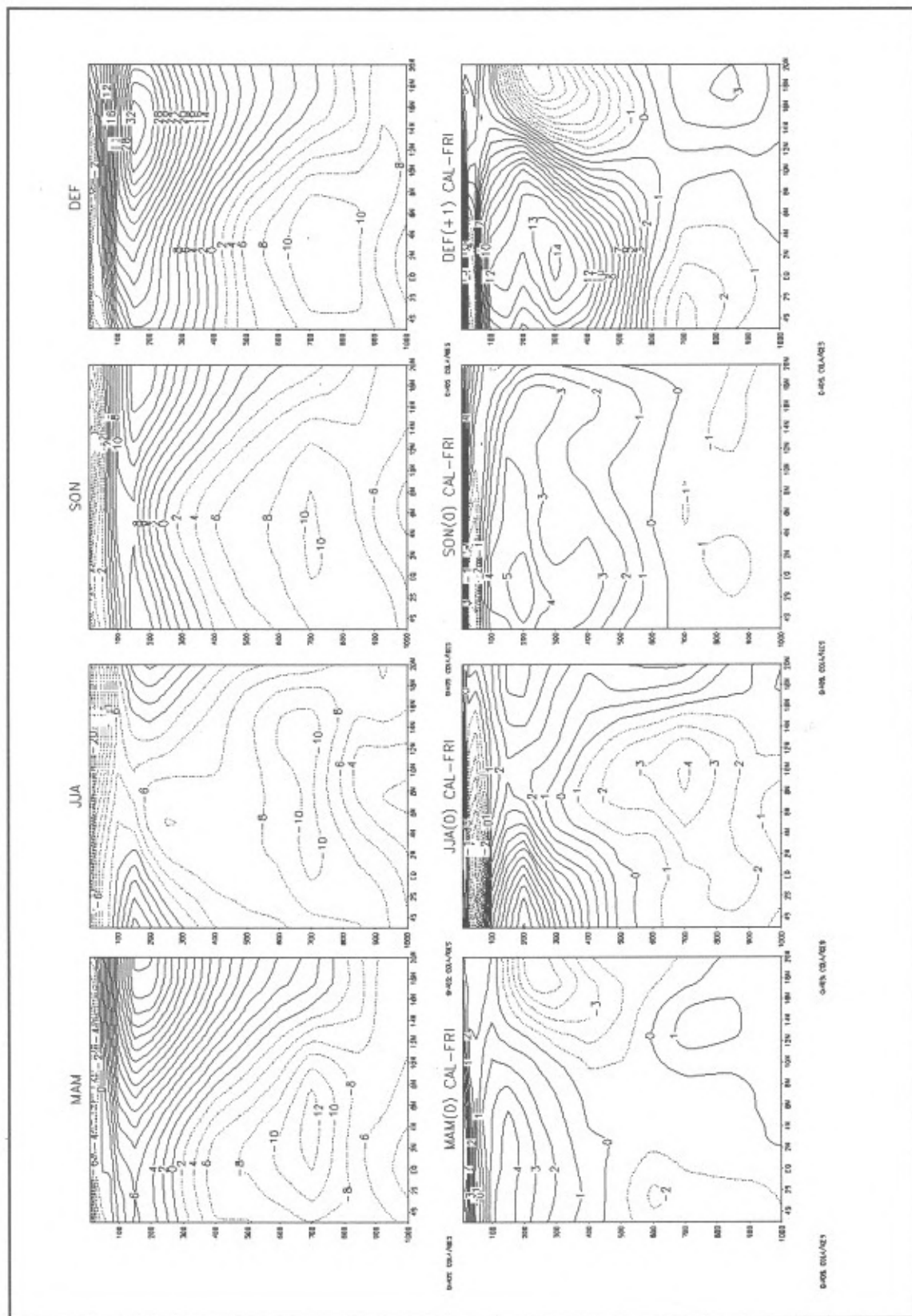


Figura 4. Ciclo anual Velocidad de viento zonal, 30 W (m/s) (superior). Diferencia entre eventos cálidos y fríos (inferior)

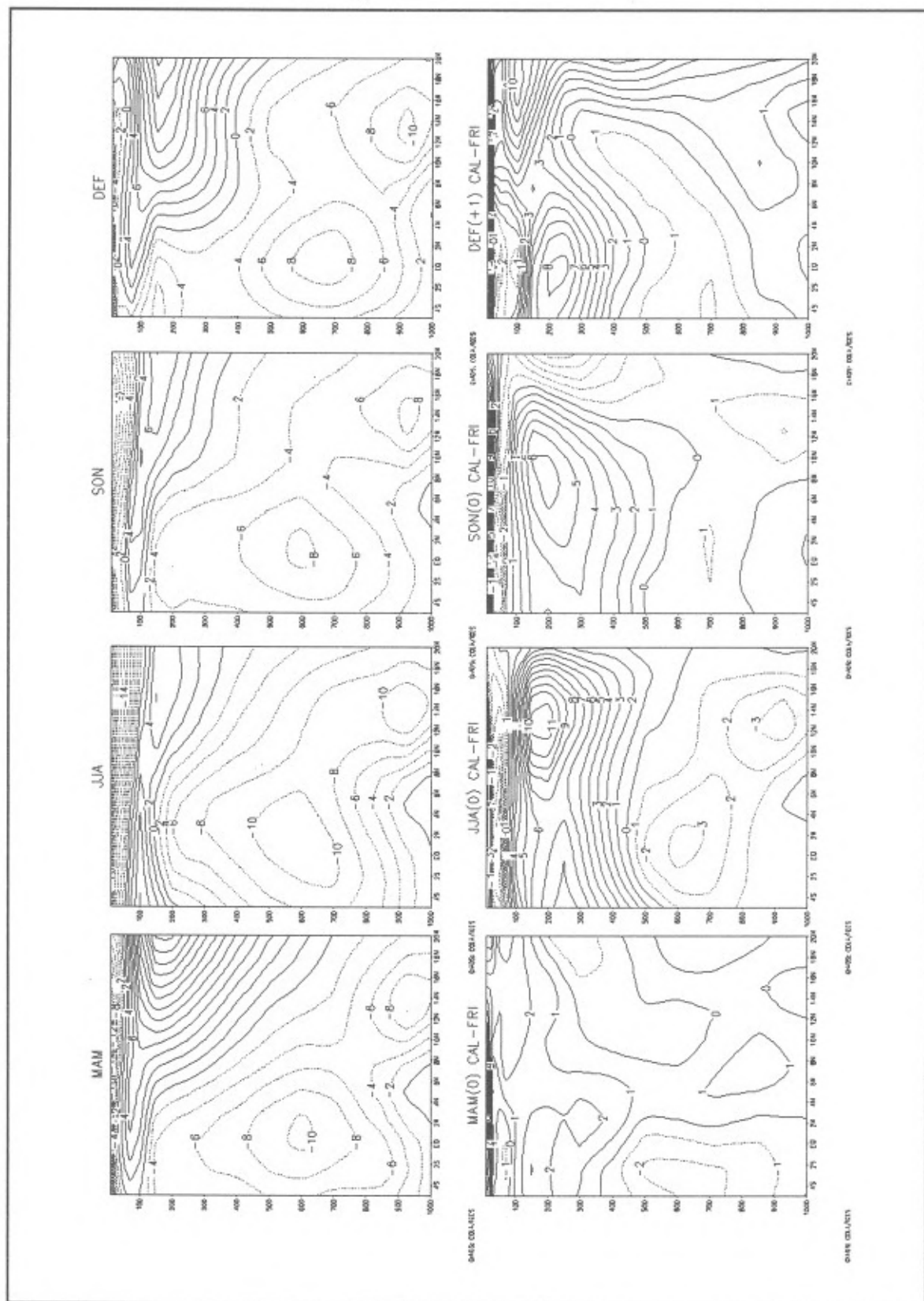


Figura 5. Ciclo anual Velocidad de viento zonal, 70 W (m/s) (superior). Diferencia entre eventos cálidos y fríos (inferior)

también se presentan dos corrientes de chorro del este, además de la corriente de chorro superficial del oeste (CHOCO). Una primera corriente de chorro del este a la altura de los 700-600 hPa, que penetra al continente suramericano proveniente del Océano Atlántico y que es posible detectarla desde el oeste de Africa. Hacia los 30°W el núcleo de la corriente alcanza velocidades de 10-12 m/s (Figura 4). En el trimestre JJA aparece alcanzando desde el ecuador hasta los 14°-15°N. Al acercarse al continente, la corriente empieza a perder velocidad en sus capas inferiores y en los trimestres de SON y DEF se baja desde los 600-700 hPa hasta los 850-800 hPa con intensidades de 10 m/s. La penetración al continente Suramericano rompe la continuidad precisa de esta corriente de chorro del este de los 700 hPa, debido a la alta convergencia en los niveles bajos de la atmósfera. Hacia los 55°W y 60°W la corriente de chorro del este tiene una forma elongada e inclinada a las capas más superficiales en el norte, lo que ya presagia su partición más adelante en dos corrientes diferentes del este. Hacia los 65°W se observa la bifurcación de la corriente de los 700 hPa en dos corrientes separadas, un ramal que continua por los 600-700 hPa, más intenso que por los 60°W, especialmente durante los trimestres de DEF y MAM. Esta mayor intensidad la adquiere con la alta divergencia de viento que se establece en los 700 hPa sobre el continente. Sobre el continente, la corriente exhibe un marcado ciclo anual, más intensa en el trimestre MAM, con velocidades del orden de más de 10 m/s en el núcleo, y más débil en el trimestre SON, con velocidades de 6 m/s en el núcleo. La corriente de chorro del este de los 700-600 hPa oscila muy poco meridionalmente, entre el Ecuador en el trimestre MAM y los 2°S en el trimestre SON. Hay una correspondencia inversa entre los trimestres de máxima y de mínima intensidad de las corrientes del CHOCO y de los 700-600 hPa, de dirección opuesta, y que merece ser explicada. La corriente de chorro de los 600-700 hPa se vuelve más superficial (800 hPa) al salir de nuevo a mar abierto sobre el Océano Pacífico tropical. Hacia los 180°W la corriente ya es poco discernible. Ver detalles en Poveda (1998).

El segundo ramal se convierte en la corriente de chorro del este superficial, localizada entre los 13°N-15°N y con núcleo un poco más abajo de los 900 hPa, y que llamaremos corriente de chorro superficial del este de SAN ANDRES (por su cercanía a la isla Colombiana sobre el Mar Caribe), con velocidades máximas de más de 12 m/s en el trimestre JJA y mínimas de 6 m/s en el trimestre SON, que proviene de los alisios del este.

El chorro del CHOCÓ se encuentra embebido entre dos corrientes de chorro del este: la corriente de chorro

superficial de los alisios del norte hacia los 13°N-15°N de SAN ANDRES, y la de los 700-600 hPa, localizada entre los 2°S y el ecuador. Parecería que estas dos corrientes de chorro del este resultan de la división de una misma corriente que proviene del este. Hacia los 70°W (Figura 5) las dos corrientes de 700-600 hPa y de SAN ANDRES se distinguen perfectamente, con velocidades mayores de 8 y 10 m/s. El ciclo anual es importante ya que se presenta una alternancia de velocidades mayores entre los trimestres de DEF y MAM (Tabla 1).

Tabla 1. Velocidades zonales máximas (m/s) de las corrientes del este de 700 hPa y de San Andrés, durante el ciclo anual (Ver Figura 5).

	MAM	JJA	SON	DEF
Corriente de 700 hPa	10	10	8	8
Corriente de San Andrés	8	10	8	10

Parte de los vientos de la corriente de SAN ANDRES se recurvan después de cruzar el istmo centroamericano y (devolviéndose) entran a formar parte de los vientos que conforman la corriente del CHOCO, en conjunción con los vientos provenientes de la recurvatura de los vientos trans-ecuatoriales del Hemisferio Sur. Una evidencia de este hecho es que la corriente de SAN ANDRES se hace más débil al seguir avanzando hacia el este, ya que para los cuatro trimestres del año, el núcleo es de menor velocidad por la Longitud 85°W que por la Longitud 80°W.

4. Conclusiones

Se ha estudiado la climatología de tres corrientes de chorro alrededor de Colombia, usando los datos del Reanálisis Climático de NCEP/NCAR. La corriente de chorro del CHOCÓ está fuertemente modulada por el ciclo anual, pero su núcleo está localizado en 5°N a través de todo el año. Esta corriente de chorro contribuye a la advección de humedad por parte de vientos fríos que interactúan con los vientos predominantes alisios del este, causando alta inestabilidad atmosférica, grandes cantidades de convección y precipitación, normales en la costa Pacífica Colombiana. La corriente del CHOCÓ está también asociada a la formación de complejos convectivos de sobre la costa Pacífica de Colombia. El origen de la corriente del CHOCÓ se explica por la recurvatura de los vientos alisios del sureste y del noreste, por el gradiente de temperaturas existente entre las regiones de

Niño1+2 y la costa Pacífica de Colombia, así también como por la existencia de un centro cuasi-permanente de bajas presiones sobre el Pacífico Colombiano y por la interacción con otras dos corrientes de chorro provenientes del este, sobre la geografía Colombiana. En efecto, en este trabajo se ha descubierto la existencia de otra corriente de chorro sobre la geografía Colombiana, localizada en el ecuador a la altura de los 700-600 hPa, también con un marcado ciclo anual, y que intructúa con la corriente del CHOCO. Además se ha descubierto que la conocida corriente de chorro superficial de los alisios del mar Caribe hacia los 12°-14°N, que hemos denominado "corriente de San Andrés", después de cruzar el istmo centroamericano, se recurva y, retornando hacia el sureste, contribuye a conformar la corriente del oeste del CHOCO sobre el Pacífico Colombiano. La evidencia indica que las dos corrientes del este se ramifican de una misma corriente de chorro proveniente del Océano Atlántico. Durante El Niño se debilitan fuertemente tanto la corriente del CHOCO, así como la corriente de los 700 hPa, y la convergencia superficial de vientos sobre Suramerica tropical, la divergencia de la zona de 700 hPa que en condiciones normales es intensa también se debilita consistentemente con la disminución de la precipitación. Los mecanismos físicos que modulan las anomalías hidrológicas durante las dos fases del ENSO en Colombia y el norte de Sur América son (Poveda & Mesa, 1997; Poveda, 1998; Poveda *et al.*, 1998): (1) el debilitamiento de la corriente de chorro superficial del oeste que penetra desde el Océano Pacífico al interior de Colombia por los 5°N, descubierta en este trabajo; (2) el debilitamiento de la corriente de chorro ecuatorial de los 700 hPa; (3) la reducción de advección de humedad desde el Mar Caribe; (4) la reducción en número e intensidad de las ondas tropicales del este sobre el Atlántico tropical norte; (5) el desplazamiento de la ZCIT hacia el sur-oeste de su posición normal, como consecuencia del establecimiento de una celda de Hadley anómala sobre el trópico de las Américas; y (6) retro-alimentación entre procesos tierra-atmósfera.

La interacción dinámica y termodinámica de las corrientes de chorro del oeste del CHOCÓ y del este de los 700 hPa y de San Andrés, es un tema de investigación primordial para entender el clima y la hidrología de Colombia, que queda abierto hacia el futuro. Para ello es absolutamente fundamental que el IDEAM implemente un programa de mediciones en tierra y en la vertical atmosférica de estas corrientes de chorro. En particular, las mediciones de radiosondeos de la corriente de chorro del Chocó debe hacerse hacia la altura de los 5°N sobre la costa Pacífica de Colombia. Las implicaciones hidro-

climáticas son importantes en tareas de diagnóstico y predicción a diversas escalas temporales, que comprenden desde el ciclo diurno hasta los ciclos interanuales asociados al evento ENSO.

Referencias

- Arnett, A. B. & C. R. Steadman, 1970. *Low-level wind flow over eastern Panama and northwestern Colombia*. ESSA Technical Memorandum ERLTM-ARL 26, U. S. Dept of Commerce, Air Resources Lab., Silver Spring, Maryland, 73 pp.
- Emanuel, K. A., 1994. *Atmospheric Convection*, Oxford University Press, New York, 580p.
- Eslava, J., 1993. Algunas particularidades climáticas de la región del Pacífico Colombiano. *Atmósfera*, 17, 45-63.
- Janowiak, J. E., P. A. Arkin, & M. Morrissey, 1994. An examination of the diurnal cycle in oceanic tropical rainfall using satellite and in situ data. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 2.296-2.311.
- Kalnay, E., M. Kanatmisu., R. Kistler & otros, 1996. The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Washington, 77, 437-470.
- López, M. E., & W. E. Howell, 1967. Cloud seeding at Medellín, Colombia, during the 1961-64 dry seasons. *J. Appl. Met.*, 4, 54-60.
- Meisner, B. N., & P. A. Arkin, 1987. Spatial and annual variations in the diurnal cycle of large-scale tropical convective clouds and precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 115, 2.009-2.032.
- Poveda, G., 1994a. Funciones Ortogonales Empíricas en el análisis de la relación entre los caudales medios en Colombia y las temperaturas de los océanos Pacífico y Atlántico. *Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología*, IAHR, Santiago de Chile, Vol. 4, 131-144.
- _____, 1994b. Cuantificación del efecto de El Niño y La Niña sobre los caudales en Colombia. *Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología*, IAHR, Santiago de Chile, Vol. 4, 107-117.
- _____, 1996. Modulación de la Hidrología de Colombia por el ENSO y otros fenómenos de gran escala. *Trabajo presentado como requisito parcial para optar a la categoría de Profesor Asociado*, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- _____, 1997. Atractores extraños (Caos) en la hidroclimatología de Colombia?, *Rev. Acad. Col. Cienc.*, Vol. 21, No. 81, 431-444.
- _____, 1998. Retroalimentación Dinámica entre el ENSO y la hidrología de Colombia, Disertación de Ph. D. En Ingeniería en Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- _____, & O. J. Mesa, 1993. Metodologías de predicción de la hidrología Colombiana considerando el evento El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). *Atmósfera*, 17, Sociedad Colombiana de Meteorología, Bogotá.
- _____, & _____, 1995. The Relationship between ENSO and the hydrology of tropical South America. The case of Colombia. *Proceedings of the Fifteenth Annual American Geophysical Union Hydrology Days*, 227-236, Atherton, CA, USA, Hydrology Days Publications.

_____ & _____, 1996a. Las fases extremas del ENSO - El Niño y La Niña - y su influencia sobre la hidrología de Colombia. *Revista de Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XI, No. 1, 21-37.

_____ & _____, 1996b. La Oscilación del Atlántico Norte y su influencia sobre la hidrología de Colombia. *Memorias XVII de los océanos Pacífico y Atlántico, Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología*, Vol. II, Guayaqui, Ecuador, IAHR, 343-354.

_____ & _____, 1997. Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale ocean-atmospheric phenomena. *Journal of Climate*, Vol. 10, 2690-2702.

_____, _____, L. F. Carvajal, & J. E. Salazar, 1994. Lluvias en Colombia: Correlación con el clima del Océano Pacífico y Análisis de Funciones Ortogonales Empíricas, *Memorias del XVI Congreso Latino-Americano de Hidráulica e Hidrología*, IAHR, Santiago de Chile, Vol. 4, 93-105.

_____ & C. Penland, 1994. Predicción de caudales medios en Colombia usando Modelación Lineal Inversa, *Memorias del XVI Congreso Latino-Americano de Hidráulica e Hidrología*, IAHR, Santiago de Chile, Vol. 4, 119-129.

_____ & W. Rojas, 1996. Impacto del fenómeno El Niño sobre la intensificación de la malaria en Colombia. *Memorias XII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*, Sociedad Colombiana de Ingenieros, Bogotá, 647-654.

_____ & _____, 1997. Evidencias de la asociación entre epidemias de malaria en Colombia y el fenómeno El Niño/Oscilación del Sur. *Rev. Acad. Col. de Cienc.*, Vol. 21, No. 81, 421-429.

_____, M. M. Gil & N. Quiceno, 1998. The Relationship Between ENSO and the Annual Cycle of Colombia's Hydro-climatology. Second International Conference on Climate and Water Helsinki, August 17-20.

Snow, J. W., 1976. The climate of northern South America, En: *Climates of Central and South America*, W. Schwerdtfeger (ed.), Elsevier, Amsterdam, 295-403.

Stensrud, D. J., 1996. Importance of low-level jets to climate: A review. *J. Climate*, 9, 1698-1711.

Velasco, I., & M. Frisch, 1987. Mesoscale convective complexes in the Americas. *Jour. Geoph. Res.*, 92, D8, 9591-9613.

COMUNIDADES VEGETALES Y PATRONES DE DEGRADACION Y SUCESION EN LA VEGETACION DE LOS CERROS OCCIDENTALES DE CHIA-CUNDINAMARCA-COLOMBIA

por

Sandra P.Cortés-S.¹, Thomas Van der Hammen² & J.Orlando Rangel-Ch.³

Resumen

Cortés-S. S. P., T. Van der Hammen & J. O. Rangel-Ch.: Comunidades vegetales y patrones de degradación y sucesión en la vegetación de los cerros occidentales de Chía-Cundinamarca-Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 23(89): 529-554, 1999. ISSN 0370-3908.

Se diferenciaron dos tipos básicos de vegetación: abierta que incluye las asociaciones: *Dichondro repentis-Cupheetum serpyllifoliae* (pastizales), *Baccharido rupicolae-Dodonaetum viscosae* (matorrales bajos), *Andropogono aequatoriensis-Epidendretum elongatae* (vegetación casmófito), *Chaetolepido microphyllae-Espeletipsietum corymbosae* (matorrales rosetosos) y cerrada con las asociaciones *Miconio ligustrinae- Weinmannietum tomentosae* y *Daphnopsio caracasanae-Xylosmetum spiculiferae*. Según la composición florística de las comunidades (incluyendo las etapas maduras y las juveniles), la profundidad del suelo, la pendiente, las unidades topográficas, el macroclima de la región y la influencia antrópica (degradación y sucesión natural), se definieron dos líneas de sucesión.

Palabras clave: Vegetación - Fitosociología - Sucesión - Cerros occidentales de Chía

Abstract

Two physiognomic plant communities were characterized: open vegetation which include the associations *Dichondro repentis-Cupheetum serpyllifoliae* (meadows), *Baccharido rupicolae-Dodonaetum viscosae* (low shrubby vegetation), *Andropogono aequatoriensis-Epidendretum elongatae* (casmophytic vegetation) and *Chaetolepido microphyllae-Espeletipsietum*

1 Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Apartado Aéreo 72449 Santafé de Bogotá.

2 Academia Colombiana de Ciencias. TROPENBOS - Colombia. Apartado Aéreo 44763 Santafé de Bogotá.

3. Instituto de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Colombia. Academia Colombiana de Ciencias A.A. 7495 Santafé de Bogotá, Email: Jerangel@ciencias.ciencias.unal.edu.co

corymbosae (shrubby vegetation-type with rosette plants). The closed vegetation include two kinds of forests, *Miconio ligustrinae*-*Weinmannietum tomentosae* and *Daphnopsio caracasanae*-*Xylosmetum spiculiferae*. According to the floristic composition, depth of the soil, slope climate, relief and the anthropic influence (including degradation and natural succession), two trends in plant succession were defined.

Key words: Vegetation - phytosociology - plant succession - western mountains - Chía.

Introducción

Los bosques montañosos del Norte de los Andes están en inminente peligro de desaparecer, especialmente los de la cordillera Oriental colombiana. La cuenca alta del río Bogotá entre 2500 y 3700 m que incluye el altiplano llamado Sabana de Bogotá (donde se encuentra la capital Santafé de Bogotá) ha perdido la casi totalidad de la vegetación boscosa primaria, solamente se encuentran pequeños restos de bosques secundarios que han sufrido entresacas y otras manifestaciones antropogénicas. Es evidente que para salvar la vegetación que queda aún y la diversidad florística asociada, es urgente delinear y ejecutar un plan de restauración ecológica, como parte del plan de ordenamiento ambiental.

Para este fin, es necesario conocer bien la vegetación remanente y su diversidad florística al igual que las secuencias vegetacionales de sucesión espontánea y su estado de degradación. Consecuentemente con estas premisas se comenzó un estudio de la diversidad de la vegetación y de la flora de la cuenca alta del río Bogotá, de las cuales la presente contribución sobre los cerros occidentales del municipio de Chía, es el primer resultado.

Estos cerros, que localmente se denominan El Manjuy, se encuentran entre 2600 y 3000 m, tienen una extensión de 8 km, con orientación NNW a SSE, y se localizan entre 4° 54' y 4° 50' latitud Norte y 74° 06' y 74° 03' longitud Oeste.

La precipitación anual del área varía entre 750 y 800 mm; con bastante probabilidad es mayor en la parte alta. El régimen de distribución de las lluvias es bimodal con épocas secas entre diciembre-marzo y entre junio y septiembre. El clima se puede clasificar como semi-seco; según el balance hídrico hay un déficit de agua en el suelo durante las estaciones secas, en las húmedas hay almacenamiento, pero no se presenta escurrimiento (Claro, 1995). La temperatura media anual en la parte baja es 13°C, disminuye hasta 11°C en las partes altas.

Los suelos en la parte sur, en laderas muy inclinadas tienen menor profundidad y están afectados por los procesos erosivos, son de los tipos Entisoles e Inceptisoles

humíferos. En la parte norte, los sitios tienen menor inclinación, los suelos tienen cenizas volcánicas con alofanos y humus, y son de los tipos Andisoles y Entisoles. En el sur, el pedoclima es diferente, el humus se ha perdido y el material parental ha evolucionado hacia arcillas, además sus condiciones ecológicas se han deteriorado severamente con la deforestación.

La serranía está conformada por rocas del grupo Guadalupe, con dominio de areniscas y «plaeners» en pendientes frecuentemente fuertes. En el sur, en el Cerro El Aguila, las pendientes son muy fuertes y la roca se encuentra en o muy cerca a la superficie, en otras partes la erosión después de la deforestación se ha manifestado en la remoción de los suelos de origen volcánico dejando entonces la roca desnuda.

Estudios anteriores

El estudio formal de la vegetación en la cordillera Oriental comenzó con las publicaciones de Cuatrecasas (1934, 1958); luego aparecieron las contribuciones de Van der Hammen & González (1960, 1963), Forero (1965), Lozano & Torres (1965), Lozano & Schnetter (1976), Rangel & Aguirre (1983) y Sturm & Rangel (1985). Cleef & Hooghiemstra (1984) se refirieron de manera preliminar a los tipos de vegetación en el área de la Sabana de Bogotá y alrededores, en buena parte con base en levantamientos de campo realizados en 1967 por T. Van der Hammen, R. Jaramillo y M. T. Murillo. Una descripción global de los tipos de bosques de la misma área se encuentra en Van der Hammen (1998).

Aunque todavía falta la descripción detallada y formal de la vegetación de esta región de acuerdo con las normas de la nomenclatura fitosociológica, las publicaciones mencionadas, permiten aproximarse de manera confiable a la elaboración de un tratamiento sinsistemático y sincológico de la vegetación del área.

Metodología

La elección de los sitios de muestreo (Fig. 1) se realizó con base en mapas de la región y en fotografías aéreas de diferentes años (1960-1990). Se hicieron visitas de

reconocimiento que permitieron delimitar las unidades topográficas más frecuentes y los diferentes tipos de vegetación a lo largo de los cerros (pastizales, matorrales, bosques y vegetación casmófita). El inventario de la flora se basó en colecciones intensivas en las cuales se procuró obtener material fértil que sirviera de referencia.

El área mínima de muestreo para cada tipo fisionómico y el registro de los parámetros cobertura y altura (estimación visual) para individuos con diámetro a la altura del pecho mayor de 2.5 cm se efectuaron según las recomendaciones de **Rangel & Velázquez** (1997). Se realizaron 55 levantamientos distribuidos así: pastizales: áreas de 9-10 m², 11 levantamientos; matorrales: áreas de 20-50 m², 29 levantamientos; bosques: áreas de 200 m², 7 levantamientos y vegetación casmófita: áreas de 40 m², 8 levantamientos. Para la diferenciación de los estratos, según altura se siguieron las recomendaciones de **Rangel & Lozano** (1986).

El estudio de la vegetación de los cerros se realizó con base en dos enfoques: estructural (fisionómico) y florístico (**Cortés**, 1997). En esta contribución principalmente se cubre lo relativo al segundo, que se realizó según la metodología fitosociológica de la escuela de Zurich-Montpellier (**Braun-Blanquet** 1979), siguiendo las recomendaciones de **Mueller-Dombois & Elleberg** (1974) y de **Rangel & Velázquez** (1997).

Los datos también se analizaron utilizando los programa TWINSPAN y Cluster analysis (**Mc Cune & Mefford**, 1995). Con las tablas finales de composición florística de cada comunidad, se obtuvo una tabla de fidelidad regional que permitió diferenciar las especies exclusivas, electivas y preferentes de cada comunidad. En esta tabla aparecen además los valores promedios de cobertura y la clase de presencia (I: 0-20%, II: 21-40%, III: 41-60%, IV: 61-80% y V: 81-100%), que facilitan el análisis sintaxonómico ulterior (**Sánchez & Rangel**, 1990; **Rangel & Velázquez**, 1997). Esta tabla es básica para definir las unidades de vegetación, desde las de nivel jerárquico inferior (facie, subasociación) hasta las de nivel superior (asociación, alianza, orden).

Cada asociación y/o unidad resultante se definió según su composición florística, distribución y las particularidades ecológicas; en la nominación se siguieron las recomendaciones del Código Internacional de Nomenclatura Fitosociológica.

Las tablas de composición florística de cada asociación incluyen las especies características tanto del sintaxón en cuestión como las de otros sintaxones; las especies accidentales o raras (presencia inferior al 10%)

se colocan al final de la tabla. El nombre de la especie es precedido por una letra que indica el hábito de la misma en el estrato en que se encontró, así: rasante (r), herbáceo (h), arbustivo (ar), arbolito (Ar), trepadora (t), bejuco (b) y epífita (e).

Resultados

Con base en las tablas de fidelidad y en la composición florística de las unidades definidas, se propone el siguiente arreglo sintaxonómico:

ORDEN . Incertae sedis

PASTIZALES

ALIANZA: Chaptalio exscapae-Cupheion serpyllifoliae

ASOCIACION: Dichondro repentis-Cupheetum serpyllifoliae

FACIE de *Dicranum frigidum* y *Breuetelia* sp.

FACIE de *Sporobulus* aff. *indicus* y *Stevia* spp.

ORDEN: Cupheo-Dodonaetalia viscosae ord. nov

MATORRALES BAJOS

ALIANZA: Stevio lucidae-Dodonaecion viscosae

ASOCIACION: Baccharido rupicola- Dodonaetum viscosae

SUBASOCIACIÓN: pellaetosum ternifoliae

VEGETACIÓN CASMOFITA

ASOCIACIÓN: Andropogono aequatoriensis-Epidendretum elongatae

SUBASOCIACIÓN: cheilanthetosum myriophyllae

SUBASOCIACIÓN: bulbostyletosum asperulae

ORDEN . Incertae sedis

BOSQUES Y MATORRALES ALTOS

ALIANZA: Myrcianto leucoxylae-Miconion squamulosae

ASOCIACIÓN: Miconio ligustrinae- Weinmannietum tomentosae (>2800 m).

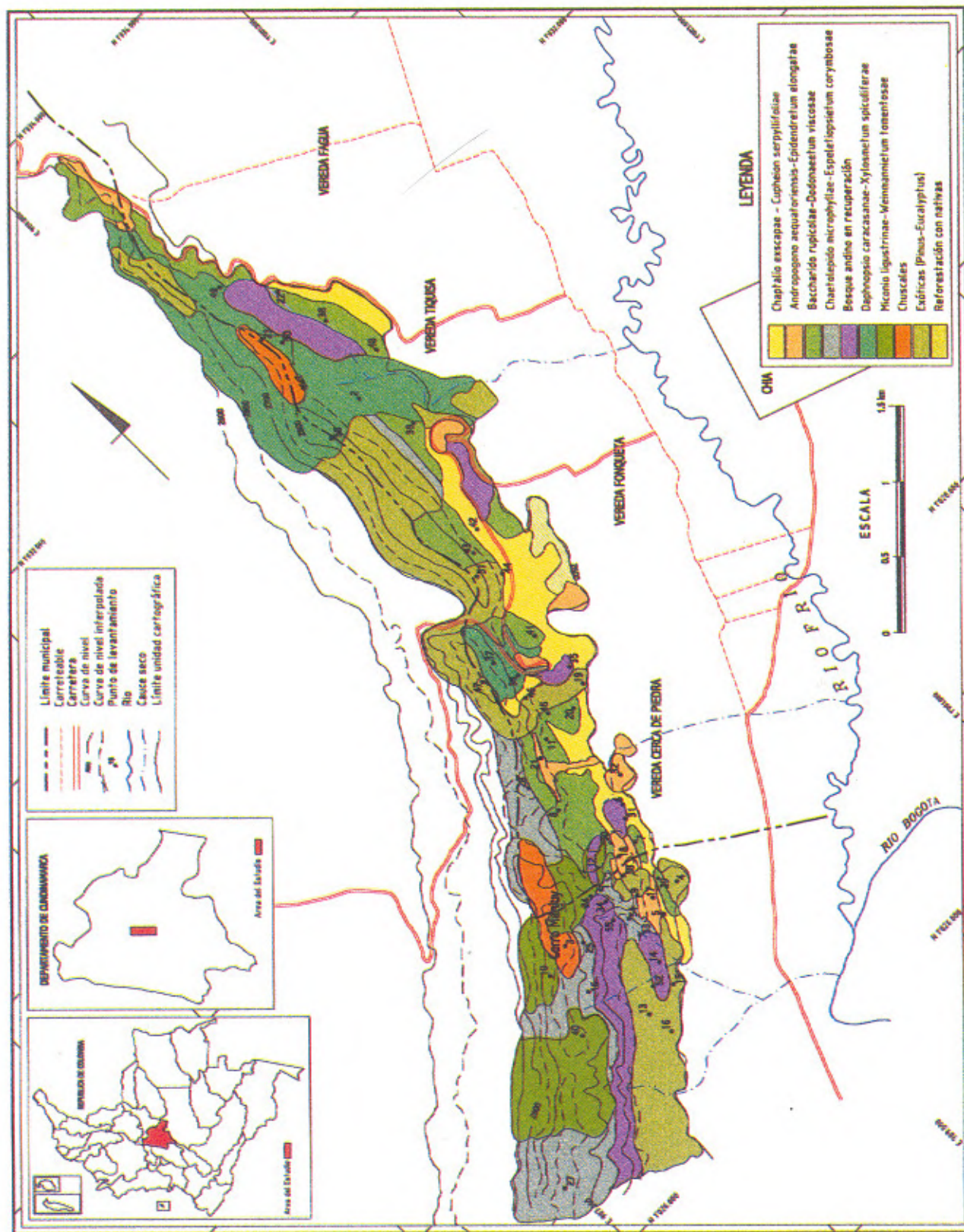


Figura 1. Mapa de distribución aproximada de los tipos de vegetación

ASOCIACIÓN: *Daphnopsio caracasanae-Xylosmetum spiculiferae* (<2800 m).

ORDEN Y ALIANZA. *Incertae sedis*

MATORRAL- ROSETAL

ASOCIACION: *Chaetolepido microphyllae-Espeletiosietum corymbosae*

SUBASOCIACIÓN: *puyetosum lineatae*

SUBASOCIACIÓN: *hypericetosum mexicanae*

El anterior arreglo sintaxonómico se describe a continuación, para su distribución ver la Figura 1.

ALIANZA: ***Chaptalia exscapae-Cupheion serpyllifoliae*** al. nov.

Tablas 1 y 6

Asociación

típica: *Dichondro repentis-Cupheetum serpyllifoliae*

Fisionomía y Composición: Pastizales sobre suelos bien desarrollados o de incipiente desarrollo. Entre las especies características exclusivas de la alianza están *Chaptalia exscapa* (r) e *Hypochaeris radicata* (r). Las especies electivas son *Pennisetum clandestinum*, *Desmodium molliculum* y *Rhynchospora nervosa*.

Distribución y Ecología: En la base de los cerros y en algunas laderas sobre los 2500 m.

ASOCIACIÓN: ***Dichondro repentis - Cupheetum serpyllifoliae*** ass. nov.

Tabla 1. Levantamiento tipo N° S.C 48 (2590m.). Fig. 2a.

Nombre vulgar: Pastizal de hierba riñón y de escobilla,

Fisionomía y Composición: Pastizales con un estrato rasante dominante (más del 70% de cobertura). El estrato herbáceo es pobre en cobertura (10 %). Especies características exclusivas son: *Dichondra repens* (r), *Chaptalia exscapa* (r), *Conyza primulaefolia* (h) y *Trifolium pratense* (r). Las especies características electivas son *Stypa* aff. *brachyphylla* (r) y *Rhynchospora macrochaeta* (h).

Distribución y Ecología: Sobre laderas con una inclinación de 10° a 45°, entre 2590 m y 2800 m, en suelos con una profundidad de 20 a 40 cm. Los potreros abandonados,

especialmente los cercanos a la base de los cerros son utilizados para el pastoreo de ganado bovino y ovino, actividad que no se realiza a gran escala, por lo tanto no hay marcados signos de pisoteo; en las cercanías de estos potreros son frecuentes los matorrales bajos y los rastrojos.

Se pueden distinguir dos facies, una de *Dicranum frigidum* y *Breutelia* sp., y la otra de *Sporobolus* aff. *indicus* con *Stevia serrata* y *S. elatior* (Tablas 1 y 6).

Tabla 1 Facie de *Dicranum frigidum* y *Breutelia* sp.

Tabla 1. Levantamientos: 37-32 S.C.

Fisionomía y Composición: Predomina el estrato rasante con *Dicranum frigidum* y *Breutelia* sp. 487-SC, con coberturas entre 5 y 30%.

Distribución y Ecología: Los musgos de la facie tienden a extenderse ampliamente en estos pastizales, especialmente en potreros que llevan algún tiempo de abandono o que están resguardados del pisoteo, ya sea por su pendiente o por su ubicación en las laderas.

Facie de *Sporobolus* aff. *indicus* y *Stevia serrata*

Tabla 1. Levantamientos: 31- 42-S.C.

Composición: Variación particular del pastizal en donde dominan *Sporobolus* aff. *indicus* (r), *Stevia serrata* (h) y *Stevia elatior* (h), las dos últimas con cobertura entre 1 y 17%.

Distribución: Sobre laderas, con pendiente moderada (véase la Tabla 1).

ORDEN: ***Cupheo-Dodonaetalia viscosae*** ord.nov

Alianza típica: *Stevio lucidae-Dodonaetion viscosae* al.nov. Tabla 2 y 3

Fisionomía y Composición: La vegetación agrupa matorrales de porte bajo, cuya densidad varía de acuerdo con la calidad del sustrato en el cual se establecen. Los más densos se presentan en suelos desarrollados y los menos densos en escarpes rocosos, generalmente en pendientes pronunciadas, con suelos poco desarrollados.

Las especies características son *Cuphea serpyllifolia*, *Anthoxanthum odoratum*, *Dodonaea viscosa*, *Setaria geniculata*, *Polygala paniculata*, *Borreria anthospermoides* y *Oxalis corniculata*.

Distribución y Ecología: Entre 2550 m y 2800 m; en la base de los cerros y sobre laderas por lo general muy pendientes, cuyo suelo varía en condiciones de humus y profundidad.

Tabla 1. Composición florística del pastizal *Dichondro repentis-Cupheetum serpyllifoliae*

Levantamiento N°	48	49	33	46	29	31	42	35	37	32	43
Area (m ²)	9	9	9	9	10	9	9	9	9	9	9
Altitud (m)	2590	2650	2760	2730	2590	2620	2700	2650	2800	2600	2730
Pendiente (grados)	40	30	35	25	5	25	30	40	20	45	30

Cobertura %

Especies características de la Alianza <i>Chaptalia exscapae-Cuphelo serpyllifoliae</i>											
<i>Chaptalia exscapa</i>	r	5		3	7		2	1	1	2	2
<i>Hypochaeris radicata</i>	r	5		1	2	2	4	1	1	8	
<i>Pennisetum clandestinum</i>	r	25	10	30	30	40	50	20	30	50	20
<i>Rhynchospora nervosa</i>	r	10	3	6	17	5	2	10			
<i>Desmodium molliculum</i>	r	1	10	28	3		6	3	17	11	

Especies características de la Asociación <i>Dichondro repentis-Cupheetum serpyllifoliae</i>											
<i>Dichondra repens</i>	r	5	11	1	6	30	11				2
<i>Conyza primulaefolia</i>	r	1	1		0.1			0.1		1	0.1
<i>Trifolium pratense</i>	r			22	6	1	6	2	7		
<i>Stipa aff. brachyphylla</i>	r		5	1	10				5	15	
<i>Paspalum sp. SC 340</i>	r	1	5	1			5	5			
<i>Stevia rhombifolia</i>	h	1	20						8		
<i>Rhynchospora macrochaeta</i>	r	1	6				1		5		

Especies de la Facies y acompañantes											
<i>Sporobolus aff. indicus</i>	r			2			10	10			
<i>Stevia serrata</i>	h						1	17	1		6
<i>Stevia elatior</i>	h				8		5	3			6
<i>Dicranum frigidum</i>	r	5								5	25
<i>Breutelia sp. SC 487</i>	r		2							11	25
<i>Aristida sp. SC 432</i>	h				20			10			5
<i>Trifolium minus</i>	r	2						1			0.1
<i>Aegopogon cenchroides</i>	r	5			5						5
<i>Rumex acetosella</i>	+										

Especies de otros Sintaxones											
Orden Cupheo - <i>Dodonaetalia viscosae</i>											
<i>Cuphea serpyllifolia</i>	r	33	40	52	4	60	44	17	30	22	6
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	r	50	7	10	30	10		10	5	20	10
<i>Oxalis corniculata</i>	r	1	10	6	3	1	11		6		1
<i>Borreria anthospermoides</i>	r	20	15	16	12	1		6	11		30
<i>Setaria geniculata</i>	r	1	1	2	10	1					
<i>Polygala paniculata</i>		0.5				0.1					
<i>Dodonaea viscosa</i>											+

Especies de la vegetación Regional											
<i>Pteridium aquilinum</i>				0.3	7	4					
<i>Commelinaceae SC 585</i>		1									8
<i>Asplenium praemorsum</i>		1									
<i>Rumex acetosella</i>	+					+		+			
<i>Mariscus flabelliformis</i>		1					1				
<i>Leptodontium SC 415</i>								8	13		
<i>Bulbostylis asperula</i>			1								

Continuación Tabla 1.

Baccharis rupicola			3	
Pleopeltis macrocarpa	1			
Stevia lucida			9	9
Echeveria bicolor	1			
Achyrocline sp. SC 355			1	1

Especies Accidentales**Estrato Herbáceo (h)**

Conyza aff. canadensis (L49/1)

Liliaceae SC 675 (L48/0.5+29/2)

Rubus bogotensis (L46/1)

Caryophyllaceae SC 270 (L29/1.1+37/1.1)

Lantana sp. SC 204 (L48/1)

Tagetes cf. pusilla (L48/1+32/1)

Fabaceae SC 400 (L33/4.4+48/3)

Salvia palaefolia (L48/1+49/1)

Chrysanthemum sp. SC 1587

Leucanthemum SC 541 (L37/1)

Galium hypocarpium (L37/4)

Pteridophyto SC 499 (L31/1)

Laennecia filaginoides (L31/1)

Estrato Rasante (r)

Lachemilla aff. aphanoides (L42/1)

Pellaea ternifolia (L43/1)

Hybanthus parvifolius (L42/1)

Rubiaceae SC 805 (L43/1)

Sysirinchium iridifolium (L48/1.1+29/2)

Brachiaria sp SC 224 (L49/1)

Polygala paniculata (L48/0.5+29/0.1)

Hypericum aff. brevistylum (L43/2.2+32/1)

Agave SC 510 (L43/1+37/7.8)

Campylopus sp. SC 1504 (L48/1+43/2)

Eragrostis sp SC 433 (L48/2L32/+)

Gramínea indet. SC 821 (L42/++29/+)

Gamochaeta SC 885 (L48/1)

Cynanchum tenelum (L43/1)

Soliva mutissi (48/1)

Plantago monticola (L48/1)

Holcus lanatus (L29/5)

+: Cobertura no estimada o inferior a 0.25m²ALIANZA: **Stevio lucidae-Dodonaeion viscosae** al. nov.

Tablas 2 y 3.

Asociación típica: Baccharido rupicolae-Dodonaeetum viscosae

Otra asociación: Andropogono aequatoriensis - Epidendretum elongatae.

Fisionomía y Composición: Matorrales bajos de zonas abiertas; las condiciones de la pedogénesis y la profundidad del suelo sirven para diferenciar las fitocenosis que agrupa la alianza: sobre suelos relativamente profundos y mejor desarrollados se dispone un matorral bajo denso; sobre escarpes rocosos con suelo superficial y poco evolucionado arraiga un pastizal-herbazal casmófito en donde la vegetación crece de manera dispersa y el cubrimiento de los estratos arbustivo y herbáceo es menor que en el caso del matorral.

En los dos tipos de vegetación cuyos elementos dominantes superan los 1.5 m de altura, dominan *Dodonaea viscosa* y especies de *Stevia*. Tabla 2

Continuación Tabla 2 Tabla 3 Especies características son *Stevia lucida*, *Echeveria bicolor*, *Calea peruviana* y *Achyrocline* sp. (S.C. 355).

Distribución: Sobre laderas de los cerros entre 2590 y los 2770 m.

Vink & Wijninga (1987), registraron comunidades con características fisionómicas similares en la región semiárida de la Laguna de La Herrera, Cundinamarca, como los matorrales de *Salvia bogotensis*, *Dodonaea viscosa* y *Chromolaena leivense*. Dicha región posee condiciones climáticas extremadamente secas y hay procesos de erosión con pérdida grave del suelo. En su vegetación aparecen especies de *Opuntia* y *Wiggingsia* (cactáceas) que no se presentan en los cerros de Chía y diferencian nítidamente las unidades de vegetación de las dos regiones.

ASOCIACIÓN: **Baccharido rupicolae-Dodonaeetum viscosae** ass. nov.

Tabla 2. Levantamiento tipo N° S.C 19 (2590 m). Fig. 2b.

Tabla 2. Composición florística del matorral bajo Baccharido rupicolae-Dodonaetum viscosae

Levantamiento N°	30	19	45	20	18	21	11	9	44
Unidad Topografica	L	L	C	L	L	L	L	L	L
Area (m ²)	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Altitud (m)	2600	2590	2660	2690	2690	2775	2770	2770	2750
Pendiente (grados)	40	45	30	60	40	50	45	30	30

Cobertura %

Especies características del Orden Cupheo-Dodonetalia viscosa										
Dodonaea viscosa	h	43	37	13	46	16	16	55	75	
Cuphea serpyllifolia	r	6	6.5	11	17	3	10	10	20	20
Anthoxanthum odoratum	r		10	5		10		10	20	
Borreria anthospermoides	r	2.5	1		1.5	1	2		5	5
Oxalis corniculata	r	1.5	7		2.5	1	1.5		20	
Setaria geniculata	r		10	10	10	10	10	20	30	
Polygala paniculata	r	0.5			1		1			0.5
Campylopus sp. SC 504	r		2.5	5		1				

Especies características de la Alianza Stevio lucidae-Dodonaetum viscosae										
Stevia lucida	h	7	4	13	13	7		8	2	15
Echeveria bicolor	r	3	8	2		1				
Calea peruviana	h	2		1	12	2	10	1		
Achyrocline sp. SC 355	r	1	2		8	1	2			2

Especies características de la Asociación Baccharido rupicolae-Dodonaetum viscosae										
Mariscus flabelliformis	r	1	1	3			2	1	1	
Baccharis rupicola	h		17	17			19	1	1	1
Lantana sp. SC 204	h	1			5		1	6		
Lourteigia stoechadifolia	r	3		16			1	1		
Cladonia sp. SC 536	r			2	2	3	3			
Conyza trihecatactis	h	2			4		1			
Stevia serrata	h		1		1					1

Subasociación Pellaeetosum ternifoliae										
Pellaea ternifolia	r	3	3	1	3		4			
Peperomia galioides	r	3	6	1	2					
Leptodontium SC 415	r	12	5	2						
Salvia palaeifolia	r	1	1							
Drymaria sp. SC 270	t	1	3				3			

Especies características de la Alianza Myrciantho leucoxyloae-Miconion squamulosae										
Miconia squamulosa	h		1		5	3	3	5	2	
Psychotria boqueronensis	h		1			7	4			
Myrsine guineensis	h							15	1	
Hesperomeles goudotiana	h						2	4		

Continuación Tabla 2

Especies características de la Alianza Chaptallo exscapae-Cupheliion serpyllifoliae										
<i>Pennisetum clandestinum</i>	r	10	30	10	30	20	70	40	10	10
<i>Desmodium molliculum</i>	r	3		1			13	2	30	
<i>Rhynchospora nervosa</i>	r	1	5		1		5		3	
<i>Hypochoeris radicata</i>			1							2
<i>Stypa aff. brachyphylla</i>	r			5				10		5

Especies características de otros Sintaxones										
<i>Epidendrum elongatum</i>	h	1	1		1	4	1			
<i>Dichondra repens</i>			12					1		
<i>Rumex acetosella</i>				5						1
<i>Myrcianthes leucoxylla</i>							24	1		
<i>Bidens rubifolia</i>	r	+	1							
<i>Xylosma spiculifera</i>	h						1	7		
<i>Muehlenbeckia tamnifolia</i>	t	+	1							
<i>Hypericum juniperinum</i>	h				1	12				
<i>Chaetolepis microphylla</i>						1				
<i>Arcytophyllum nitidum</i>						2				
<i>Andropogon aequatoriensis</i>					+					
<i>Noticastrum marginatum</i>	r				1					5
<i>Bulbostylis asperula</i>					+					
<i>Pleurothallis trilineata</i>						8				
<i>Trifolium pratense</i>							1			

Levantamiento N°	30	19	45	20	18	21	11	9	44
Unidad Topografica	L	L	C	L	L	L	L	L	L
Area (m ²)	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Altitud (m)	2600	2590	2660	2690	2690	2775	2770	2770	2750
Pendiente (grados)	40	45	30	60	40	50	45	30	30

Cobertura %

Especies de la Vegetación Regional										
<i>Pteridium aquilinum</i>	h					3			14	
<i>Asplenium praemorsum</i>	r	6	2	4	1					
<i>Ageratina gracilis</i>	h		1				3			
<i>Monnina aestuans</i>	h			2	2				1	

Especies Accidentales

Estrato Herbáceo (h)	<i>Campylopus</i> sp. SC 292 (L21/12.5)
<i>Pterydophyto</i> SC 499 (L45/5)	<i>Bryum</i> sp. SC 63 (L19/2.5)
<i>Polypodium</i> sp. SC 814 (L45/6.5)	<i>Polytrichum</i> sp. SC 584 (L21/10)
<i>Verbesina elegans</i> (L21/5)	<i>Brachytecium</i> sp. SC 879 (L45/5.5)
<i>Ageratina latipes</i> (L44/0.5)	<i>Aegopogon cenchroides</i> (L20/5; L9/20)
<i>Alonsoa meridionalis</i> (L20/+)	<i>Stipa aff. depauperata</i> (L21/+)
<i>Cuphea dipetala</i> (L41/1;L9/3)	<i>Carex jamesoni</i> (L30/+)

Continuación Tabla 2

Conyza triecatactis (L19/1)
Gaultheria regia (L18/2.5)
Baccharis macrantha (L20/2; L44/8.5)
Tillandsia sp. (L30/+)
 Liliaceae SC 675 (L30/+)
Solanum nigrum (L20/1)
Solanum sp. (L20/1)
Baccharis latifolia (L44/10.5)
Elleanthus sp. SC 555 (L19/1; L20/1.5)
Stevia elatior (L9/1)
Rubus bogotensis (L19/17; L18/1)
Estrato Rasante (r)
Campylopus sp. SC 50 (L21/1)
Odontoglossum ramulosum (L30/5; L18/1)
Cheilanthes lendigera (L30/4; L21/0.5)
 Fabaceae sp. SC 400 (L30/2; L9/5)
Rhodobryum sp. (L30/1; L45/1.5)
Aristida sp. (SC432) (L30/5; L45/3.5)
Pleopeltis macrocarpa (L30/+; L45/3.5)

Hypericum aff. *brevistylum* (L44/1)
 Cyperaceae SC 396 (L9/1)
Paspalum sp. SC 340 (L18/7.5)
Cladonia sp. (L20/+)
Lourtegia sp. SC 403 (L41/+; L9/1.5)
Sporobulus aff. *purpurascens* (L45/2)
Galium hypocarpium (L21/2.5; L41/3)
Eragrostis sp. SC 43 (L19/1%)
Cheilanthes marginata (L30/0.5; L20/1.5)
 Euphorbiaceae sp. SC 264 (L30/0.5; L20/1.5)
Panicum sp. SC 287 (L30/5; L20/5)
Gomphichis sp. SC 555 (L19/1; L20/3.5)
Chromolaena sp. SC 1553 (L19/1; L20/11)
 Poaceae sp. SC 328 (L20/5; L18/5; L44/20)
Conyza aff. *canadensis* (L19/1; L21/1)
Cora pavonia (L45/1; L44/2.5)
Breutellia sp. SC 487 (L19/5; L45/10)
Metzgeria sp. SC 557 (L19/5)
Chrysanthemum sp. SC 587 (L30/1; L19/0.5)

Nombre vulgar: Matorral de ciro y hayuelo.

Cuatrecasas (1934) caracterizó la asociación *Weinmannietum tomentosae* en la zona de Guasca entre 2700 y 3200 m, en suelo turboso y profundo, con predominio de elementos con hojas de tamaño micrófilo, como *Weinmannia tomentosa* y especies de *Clusia* y de Melastomátaceas en asociaciones de áreas muy restringidas. En el estrato arbóreo aparecían también *Hesperomeles heterophylla*, *Drimys granatensis*, *Clethra chrysoleuca* y *Oreopanax discolor* y en el arbustivo *Miconia salicifolia*, *Aragoa abietina* y especies de *Cavendishia* y *Befaria*. **Van der Hammen & González** (1963), definieron a este sintaxón como la vegetación original climácica más frecuente en los declives de las montañas que forman el borde oriental de la Sabana de Bogotá, en altitudes superiores a los 2800 m. **Van der Hammen et al.** (1967 en **Cleef & Hooghiemstra** 1984) caracterizaron varios tipos de bosque andino que incluyeron en el *Weinmannietum*, entre 2750 y 3125 m (Suba, Tenjo y Torca), con elementos que alcanzan los 20 m de altura y dominancia de *Weinmannia tomentosa*, seguida por *Myrsine guianensis*, *Rhamnus goudotiana*, *Drimys granatensis*, *Myrsine coriacea*, *Macleania rupestris*,

Clethra fimbriata y especies de *Clusia*, *Befaria* y *Miconia*. **Vargas & Zuluaga** (1980) definieron en el Páramo de Monserrate la asociación de *Weinmannia tomentosa* y *Drimys granatensis*.

Las fitocenosis mencionadas se asemejan en su aspecto fisonómico y en el dominio de *Weinmannia tomentosa*. No obstante, elementos típicos en Monserrate y en Guasca como *Drimys granatensis*, especies de *Brunellia* y de Lauráceas, que según **Van der Hammen** (inf. pers.), aparecen en condiciones climáticas más húmedas, están ausentes en los cerros de Chía, en donde por el contrario figuran como especies exclusivas *Myrsine coriacea*, *Ageratina asclepiadea*, *Diplosthepium rosmarinifolium* y *Axinaea macrophylla*. Esta condición permite considerar sintaxonómicamente diferente la asociación de Chía respecto a las ya descritas.

Por el momento no es factible establecer las relaciones con el complejo *Weinmannion* Cuatr. (*sensu lato*, 1934), y por eso no se adscribe a ningún orden. Un estudio más amplio tendrá que clarificar el arreglo sintaxonómico definitivo y hasta donde la influencia humana ha cambiado la composición de ciertos bosques de la Sabana de Bogotá.

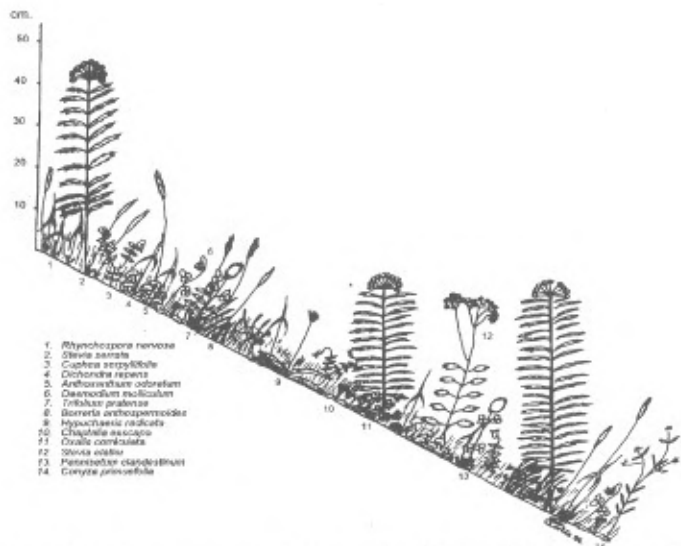


Figura 2a. Fisonomía y composición florística del pastizal *Dichondra repens*-*Cupheetum serpyllifoliae*



Figura 2c. Estructura y composición florística de la vegetación casmófita *Andropogono aequatoriensis*-*Epidendrum elongatae*

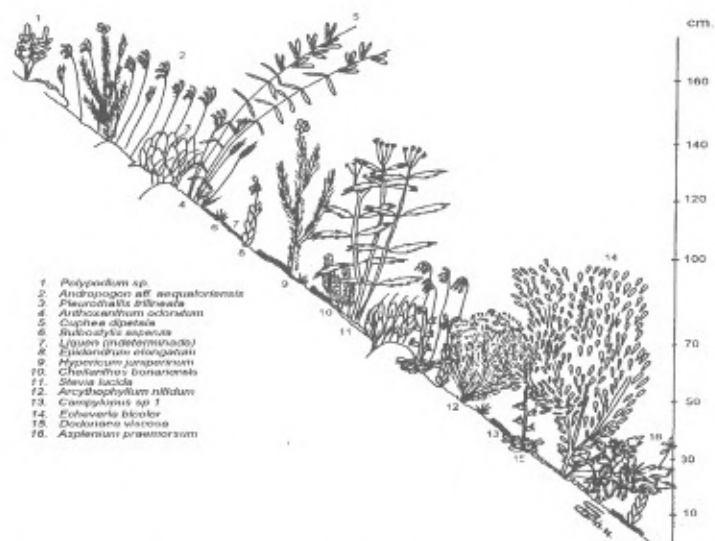


Figura 2b. Fisonomía y composición florística del matorral bajo *Baccharido rupicolaes*-*Dodonaeetum viscosae*



Figura 2d. Estructura y composición florística de matorral rosetoso *Chaetolepido microphyllae*-*Espeletipsietum corymbosae*

Tabla 3. Composición florística de la vegetación casmófita *Andropogono aequatoriensis* - *Epidendretum elongatae*

Levantamiento N°	7	6	17	15	16	41	51	52
Unidad Topográfica	L	L	L	L	L	L	L	L
Area (m ²)	40	40	40	40	40	40	40	40
Altitud (m)	2690	2620	2650	2610	2620	2610	2810	2670
Pendiente (grados)	45	47	70	80	80	70	45	50

Cobertura %

Especies características del Orden Cupheo-Dodonetalia viscosae								
<i>Dodonaea viscosa</i>	h	1	1	10	3	1		
<i>Borreria anthospermoides</i>	r	1	1	0.3				
<i>Setaria geniculata</i>	r	1		1	2	5		
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	r	20	1		1	10	10	2
<i>Cuphea serpyllifolia</i>	r	1						3
<i>Campylopus</i> sp. SC 504	r		1		8		1	7
<i>Oxalis comiculata</i>			1					
<i>Polygala paniculata</i>	r	1		1				

Especies características de la Alianza <i>Stevio lucidae</i> - <i>Dodonion viscosae</i>								
<i>Echeveria bicolor</i>	r	0.3	0.3	1	2	1	15	
<i>Stevia lucida</i>	h	0.1		3	1			6
<i>Calea peruviana</i>	h	8		4			0.3	
<i>Achyrocline</i> sp. SC 350								1

Especies características de la Asociación <i>Andropogono aequatoriensis</i> - <i>Epidendretum elongatae</i>								
<i>Epidendrum elongatum</i>	h	3		2	3	5	1	1
<i>Andropogon aequatoriensis</i>	r	10		2	2		10	2
<i>Pleurothallis trilineata</i>	r	14		12	13	13	9	8

Subasociación <i>cheilanthetosum myriophyllae</i>								
<i>Cheilanthes myriophylla</i>	r				2	1	0.3	
<i>Cuphea dipetala</i>	h				2	0.3	1	3
<i>Pleopeltis macrocarpa</i>	e				2	4	1	
<i>Agave</i> SC 510	r				1	1	0.3	
<i>Cheilanthes bonariensis</i>	r				1	1		0.3
<i>Eucalyptus globulus</i>	h		1			0.1	0.2	
<i>Lantana</i> sp. SC 521	h				1	0.4		10
<i>Cora pavonia</i>	r	0.3			1	1		
<i>Sellaginella selowii</i>	r				2	3		
<i>Peperomia ilaloensis</i>	r				1	5		
<i>Pitcairnia pungens</i>	r				6	5		
<i>Rumex acetosella</i>	r					5	5	1

Subasociación <i>bulbostyletosum asperulae</i>								
Poaceae SC 328	r	5	5	1			5	
<i>Bulbostylis asperula</i>	r	2	3	5				5
<i>Noticastrum marginatum</i>	r	1	1	1				
<i>Ditassa longiloba</i>	r	1		3				
Euphorbiaceae SC 264	r	0.3	0.3				1	
<i>Gaultheria regia</i>	r	5	5					
<i>Panicum</i> sp. SC 287	r	1	5					

Continuación tabla 3

Especies de otros Sintaxones							
<i>Peperomia galioides</i>	r			1	6		5
<i>Hypericum juniperinum</i>	h	1	1	1		1	3
<i>Arcytophyllum nitidum</i>	h	8	1	2			5
<i>Chaetolepis microphylla</i>	r	6	30				
<i>Lourtegia stoechadifolia</i>				1			3
<i>Excremis coarctata</i>							1
<i>Psychotria boqueronensis</i>					1		
<i>Espeletiopsis corymbosa</i>		1					
<i>Pellaea ternifolia</i>			1				
<i>Mariscus flabelliformis</i>							5
Especies de la vegetación Regional							
<i>Ageratina gracilis</i>	h			1	1	1	2
<i>Asplenium praemorsum</i>	r		0.3		2	1	1
<i>Pteridium aquilinum</i>	h			2		4	
<i>Monnina aestuans</i>	h			1	1		
<i>Commelinaceae</i> sp. SC 586							1
Especies Accidentales							
Estrato Arbustivo (ar)				<i>Polypodium triseriale</i> (L41/5.25)			<i>Lycopodium clavatum</i> (L7/13.75)
<i>Eucalyptus globulus</i> (L41/2.25)				<i>Gnaphalium</i> sp.2 SC 887 (L51/2.5)			<i>Cladonia</i> sp.2 (L52/2.5)
<i>Cavendishia bracteata</i> (L52/3.75)				<i>Tillandsia denudata</i> (L16/1)			<i>Parmelia</i> sp. (L52/1)
Estrato Herbáceo (h)				<i>Sonchus oleraceus</i> (L51/0.25)			<i>Bryum</i> sp. SC 631 (L15/8)
<i>Desmodium molliculum</i> (L51/2.5)							
<i>Gaultheria anastomosans</i> (L7/2.5)							
<i>Odontoglossum ramulosum</i> (L17/1;L16/0.8)							
<i>Stachys bogotensis</i> (L15/1)							

ORDEN Y ALIANZA: Incertae sedis

ASOCIACIÓN: *Chaetolepido microphyllae-Espeletiopsisium corymbosae* ass. nov.

Tabla 5. Levantamiento tipo N° S.C 54 (2780 m.). Fig. 2d.

Nombre vulgar: Matorral de doradilla y frailejón.

Fisionomía y Composición: Frailejonales-arbustivos (matorrales-rosetales) en los cuales dominan los estratos herbáceos (80%) y rasante (60%).

Las especies características exclusivas de la asociación son *Espeletiopsis corymbosa* (h), *Chaetolepis microphylla* (r), *Epidendrum chioneum* (h), *Gaultheria anastomosans* (r), *Excremis coarctata* (h). Las especies electivas son *Arcytophyllum nitidum* (h), *Lycopodium thyoides* (r), *Hypericum juniperinum* (h). Como preferentes de la asociación, se encuentran *Befaria resinosa* e *Hypericum* sp. (S.C. 119).

Distribución y Ecología: En las partes más altas como en las laderas y en la cima de los cerros, lugares en donde la exposición a los factores climáticos es mayor (temperaturas, vientos, evapotranspiración); entre 2700 y 3000 m de altitud, especialmente hacia el sur del cerro Manjuy donde se alcanzan los puntos más elevados. Los suelos son poco profundos (10-30 cm) y en algunos sitios se presentan afloramientos de roca.

La asociación se relaciona parcialmente con la vegetación que Vargas & Zuluaga (1980) mencionaron en el páramo de Monserrate (3000 m de altura), como "cordón de ericáceas" y con otras de la cordillera Oriental con dominio de especies de los géneros *Espeletia* y *Espeletiopsis* (Cuatrecasas, 1934; Lozano & Schnetter, 1976; Rangel & Sturm, 1995; Vargas & Rivera, 1990). Sin embargo, las especies exclusivas del sintaxón de Chía lo diferencian claramente de las otras comunidades registradas como "cordón de ericáceas".

Tabla 4. Composición florística de los bosques de la Alianza Myrciantho leucoxyloae-Miconion squamulosae

Levantamineto N°	13*	14*	22*	38*	23	36	56	39	24	40	10	12*	3*
Unidad Topográfica	PM	L	L	C	C	L	H	L	H	C	C-L	L	C
Area (m ²)	25	60	50	50	200	200	200	200	200	200	200	50	25
Altitud (m)	2670	2610	2620	2660	2790	2800	2850	2650	2830	2960	2960	2870	2990
Pendiente (grados)	20	35	45	15	20	45	0	30	20	20	30	70	0

Cobertura %

Especies características de la Alianza Myrciantho leucoxyloae-Miconion squamulosae													
Myrcianthes leucoxyloa	Ar	3	12	2	9	3	10		5	6	0		
Miconia squamulosa	ar	24	7	11	2	20	2	10	5	31	1		
Psychotria boqueronensis	ar	0	2	2	1	3	2	10	5	31	1		
Myrsine guineensis	Ar	1	5	43	1	1		9	7	1	6		
Macleania rupestris	ar	4		28	3			0.2	0.2	3	4	6	3
Oreopanax floribundum	Ar	2				6	8	5	1	3	0.3	0.1	0.3
Hesperomeles goudotiana	Ar	1	2					+	4	1	+	4	7
Smilax tomentosa	b					+	+	1		+	+	+	
Tillandsia biflora	e							+	+	+	+		

Especies características de la Asociación Miconia ligustrinae-Weinmannietum tomentosae													
Myrsine coriacea	Ar						0		1	2	1	14	2
Viburnum sp. SC 175	Ar	14						9	1	1	0	12	
Ageratina asclepiadea	ar	1					3		5	1	6	5	
Weinmannia tomentosa	Ar								9	18	26	36	14
Miconia ligustrina	ar								7	9	8	5	50
Clethra fimbriata	ar								2	1	1	4	5
Diplostegium rosmarinifolium	Ar								0.2	10	2		6
Ilex kunthiana	Ar								0	1	10		28
Cavendishia bracteata	ar						1		5	8	16		
Rhamnus goudotiana	Ar						0.1		0.3	0	0.8		
Chusquea aff. scandens	h							18	6		23	30	
Axinaea macrophylla	Ar									1	0		
Cavendishia aff. nitida	Ar									2	+		
Pernettya prostrata	h									4	1		
Dicranum frigidum	r									+	+		
Leptodontium sp. SC 415	r									+	+		
Hypnum amabile	r									+	+		

Especies características de la Asociación Daphnopsis caracasanae-Xylosmetum speculiferae													
Xylosma spiculifera	Ar	5	20		34	6	17	22	11		0.4		
Daphnopsis caracasana	Ar	18	29			6	5	12			2		
Pterydophyto SC 499	h		1	8	0.4		0.3	0.4	0.1				
Peperomia rotundata	h			1	1	15	1	8	2		3		
Passiflora bogotensis	b	+	+	+	+	+	+		+				
Muehlenbeckia tamnifolia	t		+	+	+		+		+				
Piper barbatum	Ar	2		18	6	3		14	6		2		
Vallea stipularis	Ar	3			3	4	17				23	2	
Niphidium mortonianum	r	1			4	3	0.3	1	0.5				
Asplenium harpeodes	r					10	0.3	0.3	0.3		3		
Asplenium auritum	h	5			0.4	+			1				
Cordia sp. SC 214	Ar				5		2		5		4		
Rhynchospora cf. ruiziana	r			3		1		2	1		1		
Asplenium monanthes var. castanea	r				1	+	1	2			0.4		
Duranta mutisii	Ar			6	10				1	3			
Campyloneuron SC 717	r				1		0.3	2					
Pleurothallis phalangifera	h					+	+		1				
Cestrum sp. SC 172	ar					2	1	0.1					
Asplenium dimidiatum	r			0.4	2	+			0.2				
Rubus bogotensis	h			2		5	4						
Lantana sp. SC 204	ar		1	1					0.4	0.1			
Polypodium laevigatum	e						0.4	+		+		20	

Continuación tabla 4

Solanum caripense	ar		2	0.1	0.1		
Bidens rubifolia	b	0.4	0.1	+		+	
Cynanchum tenellum	t		+	1.0		+	
Chromolaena sp.3 624-SC	ar		3	2.0	1	1.5	4
Phyllanthus salviaefolius	Ar	2			1	6	
Pentacalia haughtii	t		+		+	+	

Especies de otros Sintaxones

Pleurothallis trilineata	r		16	2	1	+	1
Epidendrum elongatum	h		1		0.2		
Arcytophyllum nitidum							2
Baccharis rupicola		2					
Borreria anthospermoides							2
Excremis coarctata							2

Especies Accidentales

Estrato Subarbóreo (Ar)	Rhynchospora nervosa (L56/3.2)	Conneliaceae SC 586 (L39/0.6; L40/0.33)
Barnadesia spinosa (L24/8.87)	Salvia palaefolia (L5/0.83)	Drymaria sp. SC 270 (L36/1.05)
Pentacalia sp. SC 881 (L40/8.27)	Vasquezia anemonifolia (L36/0.1)	Galium hypocarpium (L23/+, L34/+)
Estrato Arbustivo (ar)	Palicourea lineariflora (L24/5); (L40/0.2)	Epifitas-Trepadoras-Bejucos (e,r,b)
Ageratina asclepiadea X A. gynoxoides (L10/+)	Peperomia microphylla (L56/0.55; L10/5)	Lepidopilum sp. SC 895 (L23/+)
Ageratina baccharoides (L10/1.75)	Agavaceae SC 510 (L14/10; L36/0.15)	Metzgeria sp. SC 557 (L36/+)
Ageratina tinifolia (L12/5)	Conyza trihecatactis (L14/0.6; L36/0.5)	Plagiochila sp. SC 756 (L23/+)
Arcytophyllum nitidum (L40/1.5)	Estrato Rasante (r)	Platyhyphnidium aquaticum (L36/+)
Baccharis cf. prunifolia (L1/9)	Breutelia sp. SC 487 (L10/+)	Polytrichadelphus sp. SC 631 (L23/+)
Baccharis macrantha (L1/5)	Bryum argenteum (L3/11)	Pyrnrobryum sp. SC 830 (L23/+)
Befaria aff. congesta (L40/2)	Campylopus sp. 1. SC 504 (L3/6)	Epidendrum megalospathum (L56/+; L39/+)
Brachyotum strigosum (L3/5)	Cladonia sp. 779-SC (L40/26.8)	Epidendrum excisum Ldl (L36/+; L56/+)
Chromolaena sp. 4 SC 456 (L23/0.25)	Cladonia dydyma (L23/+)	Epidendrum karstenii Rchlf. (L39/+)
Cordia sp. 2 SC 260 (L36/3)	Ditrichum sp. SC 303 (L36/+)	
Lippia hirsuta (L36/2.05)	Hypnum anabile (L12/10)	
Monochaetum myrtoideum (L12/1.3)	Leptodontium sp. SC 415 (L12/15)	
Palicourea angustifolia (L10/0.5)	Lophocolea sp. SC 755 (L39/+)	
Verbesina sp. SC 480 (L22/34.8)	Meteoridium remotifolium (L23/+)	
Lepidaploa sp. SC 715 (L36/0.125; L39/0.5)	Pogonatum sp. SC 900 (L39/+)	
Fraxinus chinensis (L56/0.25; L39/+)	Hydrocotyle sp. (L23/1; L56/+)	
Myrica parvifolia (L40/2.60; L12/18)	Neckera sp. 899-SC (L23/+; L56/+)	
Estrato Herbáceo (h)	Campylopus sp. 3 (L36/+; L12/10)	
Cheilanthes lendigera (L14/0.4)	Bryum sp. 631-SC (L36/+; L10/+)	
Chromolaena sp. SC 185 (L1/30)	Mittenothamnium reptans (L56/+; L40/+)	
Cyclopogon aff. peruvianus (L38/3)	Blechnum occidentale (L56/+; L40/+)	
Elleanthus sp. (L10/1.3)	Pilea sp. (L39/1.2; L24/0.75)	
Epidendrum elongatum (L12/20)	Elaphoglossum sp. (L24/4.3; L12/10)	
Odontoglossum ramulosum (L36/0.15)	Breutelia sp. SC 487 (L10/+); (L3/+)	
Peperomia colorata (L36/+)	Rhodobryum grandifolium (L39/+; L40/+)	

+ : Cobertura no estimada o inferior a 0.25m²

Dentro de la asociación se pueden distinguir dos subasociaciones, una de *Puya lineata* y otra de *Hypericum mexicanum* (Tablas 5 y 6).

SUBASOCIACIÓN: *puyetosum lineatae* subass. nov.

Tabla 5. Levantamiento tipo N° S.C 50 (2770 m.)

Levantamientos S.C 25-50-54-53

Fisionomía y Composición : Matorral rosetoso con valores de cobertura mayores en el estrato herbáceo (70%); la especie dominante es *Puya lineata* (h) acompañada por *Elleanthus cf. purpureus* (h) y *Gaultheria regia* (h); el estrato arbustivo con poca cobertura, está conformado por *Bucquetia glutinosa*, *Macleania rupestris*, *Cavendishia bracteata* y *Hesperomeles goudotiana*.

Continuación tabla 5

<i>Baccharis rupicola</i>					5					
<i>Achyrocline</i> sp. SC 355								2		3
<i>Psychotria boqueronensis</i>					2					
<i>Hypochoeris radicata</i>										1
<i>Pleurothallis trilineata</i>	r	1	2				2			
Especies de la vegetación Regional										
<i>Ageratina gracilis</i>	h	7	1.5	0.2	7				1	1
<i>Pteridium aquilinum</i>	h	10	9		17	6.5	10	20	25	23
Especies Accidentales										
Estrato herbáceo (h)										
<i>Chromolaena</i> sp.2 SC 185 (L50/1+L/54 0.5)										
<i>Ageratina latipes</i> (L55/1+L53/1)										
<i>Galium hypocarpium</i> (L55/5;L8/1)										
<i>Myrica</i> aff. <i>pubescens</i> (L27/2)										
<i>Odontoglossum ramulosum</i> (L55/0.5)										
<i>Lepidaploa karstenii</i> (L5013)										
<i>Brachyotum strigosum</i> (L34/2.5;L8/1))										
<i>Gaylussacia buxifolia</i> (L55/2; L8/2;L27/1)5)										
<i>Conyza trihecatactis</i> (L55/0.5;L34/2))										
<i>Eryngium humboldtii</i> (L55/1;L34/2;L25/1)										
<i>Baccharis tricuneata</i> (L26/1)										
<i>Miconia</i> aff. <i>parvifolia</i> (L26/1)										
Estrato rasante (r)										
<i>Lycopodium clavatum</i> (L8/20+L27/1.5)										
<i>Sabazia</i> aff. <i>densa</i> (L55/1.5+L34/1)										
Poaceae SC 328 (L 55/10+L50/5)										
<i>Paspalum</i> sp. SC 340 (L55/1;L26/5)										
<i>Stipa ichu</i> (L8/2;L28/10)										
<i>Agrostis</i> sp.2 SC 658 (L27/1)										
<i>Rhodobryum</i> sp. SC880 (L55/4)										
<i>Leucoloma</i> sp. SC 880 (L55/4)										
<i>Verbesina elegans</i> (L34/4; L54/1)										
<i>Usnea</i> sp. SC 352 (L34/0.5)										
<i>Noticastrum marginatum</i> (L34/0.5)										
<i>Rhynchospora macrochaeta</i> (L54/2.5)										
Racomitrium sp. (L53/1)										
<i>Aristida</i> sp. SC 432 (L53/0.5)										
<i>Ditassa longiloba</i> (L26/0.5)										
<i>Gomphichis</i> sp. SC 816 (L26/1)										
<i>Lobelia tenera</i>										
<i>Drymaria</i> sp. SC 270										

Distribución: En franjas altitudinales cercanas a 2700 m, en sitios con pendientes moderadas.

Tabla 5 Tabla 6 Continuación Tabla 6 Figuras 2a a 2d

Figura 3a a 3b

SUBASOCIACIÓN: *hypericetosum mexicanae* subass. nov.

Tabla 5. Levantamiento tipo N° S.C 27 (2990 m.)

Levantamientos S.C 27-26-28

Fisionomía y Composición: Matorrales densos con un estrato herbáceo dominante en cobertura 86 %; *Puya nitida* (h) domina en cobertura e *Hypericum mexicanum* (h) es una especie constante. El estrato rasante tiene una cobertura de 73%. Otras especies acompañantes son *Clethra fimbriata* (h), *Paepalanthus colombianus* (r) y *Geranium* aff. *multiceps* (r).

Distribución: En la franja de 2900 m, en sitios con suelos poco profundos, localizados especialmente hacia el sur de la región.

Discusión

Aspectos de la dinámica de la vegetación

Los patrones de la vegetación que se observan actualmente en el área de estudio, son el resultado de tres factores: los suelos, la influencia antrópica y la sucesión natural, con frecuencia relacionados entre sí: El hombre al deforestar, causa cambios importantes en la vegetación original y en algunos casos puede desaparecerla. La sucesión natural tiende al retorno gradual de la vegetación original y a la recuperación de la fase húmica del suelo, mientras que la desaparición de la vegetación puede conducir a la degradación de la fase húmica, a la disminución del espesor del suelo y al cambio del pedoclima (esto último mas acentuado cuando las pendientes son mayores).

De acuerdo con estas consideraciones, en los sitios con los tipos de vegetación descritos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Cuando aflora la roca, la vegetación es de tipo casmófito. Es posible que en una situación natural con

Tabla 6. Fidelidad de las especies en la vegetación regional

COMUNIDADES	P	MB	VC	MR	B1	B2
ESPECIES EXCLUSIVAS DE LOS SINTAXONES						
<i>Chaptalia exscapa</i>	V-3.07	-	-	-	-	-
<i>Dichondra repens</i>	IV-9.44	II-6	-	-	-	-
<i>Coryza primulaefolia</i>	III-0.58	-	-	-	-	-
<i>Trifolium pratense</i>	III-7.20	I-1	-	-	-	-
<i>Cheilanthes bonariensis</i>	-	II-0.8	III-1.25	-	-	-
<i>Andropogon aequatoriensis</i>	-	I+	IV-9.33	-	-	-
<i>Pellaea ternifolia</i>	I-1	III-2.50	I-1	-	-	-
<i>Lourteigia stoechadifolia</i>	-	III-5.13	-	-	-	-
<i>Mariscus flabelliformis</i>	I-1	IV-1.42	I-5	-	-	-
<i>Espeletiopsis corymbosa</i>	-	-	I-1	V-16.04	-	-
<i>Epidendrum chioneum</i>	-	-	-	V-3.30	-	-
<i>Gaultheria anastomosans</i>	-	-	I-2.5	V-4.42	-	-
<i>Campylopus sp. 7 337-SC</i>	-	-	-	IV-5.66	-	-
<i>Excremis coarctata</i>	-	-	-	IV-8.41	-	I-2
<i>Hypericum mexicanum</i>	-	-	I-5	III-1.90	-	-
<i>Befaria resinosa</i>	-	-	-	III-4.54	-	-
<i>Hypericum 119-SC</i>	-	-	-	III-1.30	-	-
<i>Bucquetia glutinosa</i>	-	-	-	III-4.24	-	-
<i>Puya lineata</i>	-	-	-	II-17.13	-	-
<i>Puya nitida</i>	-	-	-	II-11.33	-	-
<i>Myrsine coriacea</i>	-	-	-	-	I+	V-4
<i>Weinmannia tomentosa</i>	-	-	-	-	-	V-21
<i>Miconia ligustrina</i>	-	-	-	-	-	V-16
<i>Clethra fimbriata</i>	-	-	-	II-3	-	V-3
<i>Diplostegium rosmarinifolium</i>	-	-	-	-	-	IV-4
<i>Ilex kunthiana</i>	-	-	-	-	-	IV-10
<i>Rhammus goudotiana</i>	-	-	-	-	I+	III-0.4
<i>Xylosma spiculifera</i>	-	-	-	-	V-25	-
<i>Daphnopsis caracasana</i>	-	-	-	-	V-14	I+
<i>Peperomia rotundata</i>	-	-	-	-	IV-4.5	I-2
<i>Piper barbatum</i>	-	-	-	-	IV-8	-
<i>Vallea stipularis</i>	-	-	-	-	III-6.7	I-1.5
<i>Niphidium mortonianum</i>	-	-	-	-	IV-1.5	I+
<i>Duranta mutisii</i>	-	-	-	-	III-5	-
Especies comunes Vegetación cerrada (Bosques)						
<i>Ageratina asclepiadea</i>	-	-	-	-	II-1.6	IV-4
<i>Chusquea aff. scandens</i>	-	-	-	-	I-17	III-20
<i>Asplenium harpeodes</i>	-	-	-	-	III-3	II-12
<i>Myrcianthes leucoxyla</i>	-	-	-	-	IV-6.5	III-4
<i>Macleania rupestris</i>	-	-	-	-	IV-7	V-9
<i>Oreopanax floribundum</i>	-	-	-	-	IV-4	V-16
<i>Miconia squamulosa</i>	-	IV-3	-	-	V-10	II-20
<i>Hesperomeles goudotiana</i>	-	-	-	-	III-1.5	V-3
<i>Smilax bogotensis</i>	-	-	-	-	II+	III+
<i>Myrsine guianensis</i>	-	-	-	II-8	IV-7	III-5

Continuación tabla 6

COMUNIDADES	P	MB	VC	MR	B1	B2
Especies comunes Vegetación abierta (Pastizales-matorrales)						
<i>Polygala paniculata</i>	I-0.5	III-0.75	I-0.8	I-4	-	-
<i>Dodonaea viscosa</i>	I+	V-38	IV-3	II-4	I-3	-
<i>Cuphea serpyllifolia</i>	V-31	V-10	II-2	II-3	-	-
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	V-17	III-11	IV-7	II-9	-	-
<i>Borreria anthospermoides</i>	V-13	IV-2.5	II-1	I-2.5	-	-
<i>Bulbostylis asperula</i>	I+	I+	III-4	II-5	-	-
<i>Oxalis corniculata</i>	IV-5	I-1	I-1	I-2.5	-	-
<i>Hypochaeris radicata</i>	IV-3.03	II-1.3	-	I-1.5	-	-
<i>Rhynchospora nervosa</i>	IV-8	III-3	-	I-2.5	I-3	-
<i>Baccharis rupicola</i>	I-3	IV-9	-	I-5	I-2.5	-
<i>Echeverria bicolor</i>	I-1	III-4	IV-3	-	I-2.5	-
<i>Desmodium molliculum</i>	IV-10	III-10	I-2.5	-	-	-
<i>Stevia lucida</i>	I-9	V-8	III-3	-	-	-
<i>Setaria geniculata</i>	III-3	IV-15	III-2	-	-	-
<i>Stipa aff. brachyphylla</i>	III-5	II-6	-	II-13	-	-
<i>Hypericum juniperinum</i>	-	II-6	IV-2	V-4.5	-	-
<i>Calea peruviana</i>	-	IV-4.5	II-3	III-2	-	-
<i>Chaetolepis microphylla</i>	-	I-0.5	II-18	V-30	-	-
<i>Pennisetum clandestinum</i>	V-32	V-26	-	-	-	-
<i>Cuphea dipetala</i>	-	II-2	III-1	-	-	-
<i>Stevia serrata</i>	III-6	II-1	-	-	-	-
Especies de la Vegetación regional (Cosmopolita)						
<i>Leptodontium 415-SC</i>	-	II-6.33	I-1	-	II-10	-
<i>Ageratina gracilis</i>	-	II-2	III-1	III-3	I-1	I-10
<i>Pteridium aquilinum</i>	II-3	II-8	II-2.5	V-13	-	II-10
<i>Asplenium praemorsum</i>	I-1	III-3	III-1	-	I-2	I-3
<i>Commelinaceae (SC 586)</i>	I-4	III-15	-	-	I-0.5	I-0.5
<i>Cavendishia bracteata</i>	-	-	I-4	III-5	I-0.7	III-10
<i>Epidendrum elongatum</i>	-	III-1.5	V-2	-	I-0.6	-
<i>Peperomia galioides</i>	-	III-3	III-3	-	V-7	-
<i>Monnina aestuans</i>	-	II-1.5	II-1	-	II-0.5	-
<i>Achyrocline sp. (SC 355)</i>	I-1	IV-25	I-0.5	I-2.5	I-0.3	-
<i>Arcytophyllum nitidum</i>	-	I-1.5	III-4	V-11	-	I-1.5
<i>Pleurothallis trilineata</i>	-	I-8	IV-11	I-1	III-4	I-1
<i>Campylopus sp. (SC 1504)</i>	I-1.5	II-3	III-4	-	-	I+

P= Pastizal: *Dichondro repentis*-*Cuphectum serpyllifoliae*

MB= Matorral bajo: *Baccharido rupicolae*-*Dodonaeetum viscosae*

VC=Vegetación casmófito: *Andropogono aequatoriensis*-*Epidendretum elongatae*

MR= Matorral rosetoso: *Chaetolepido microphyllae* - *Espeletiosietum corymbosae*

B1= Bosque Andino bajo: *Daphnopsio caracasanae*-*Xylosmetum spiculiferae*

B2= Bosque Andino alto: *Miconio ligustrinae*-*Weinmannietum tomentosae*

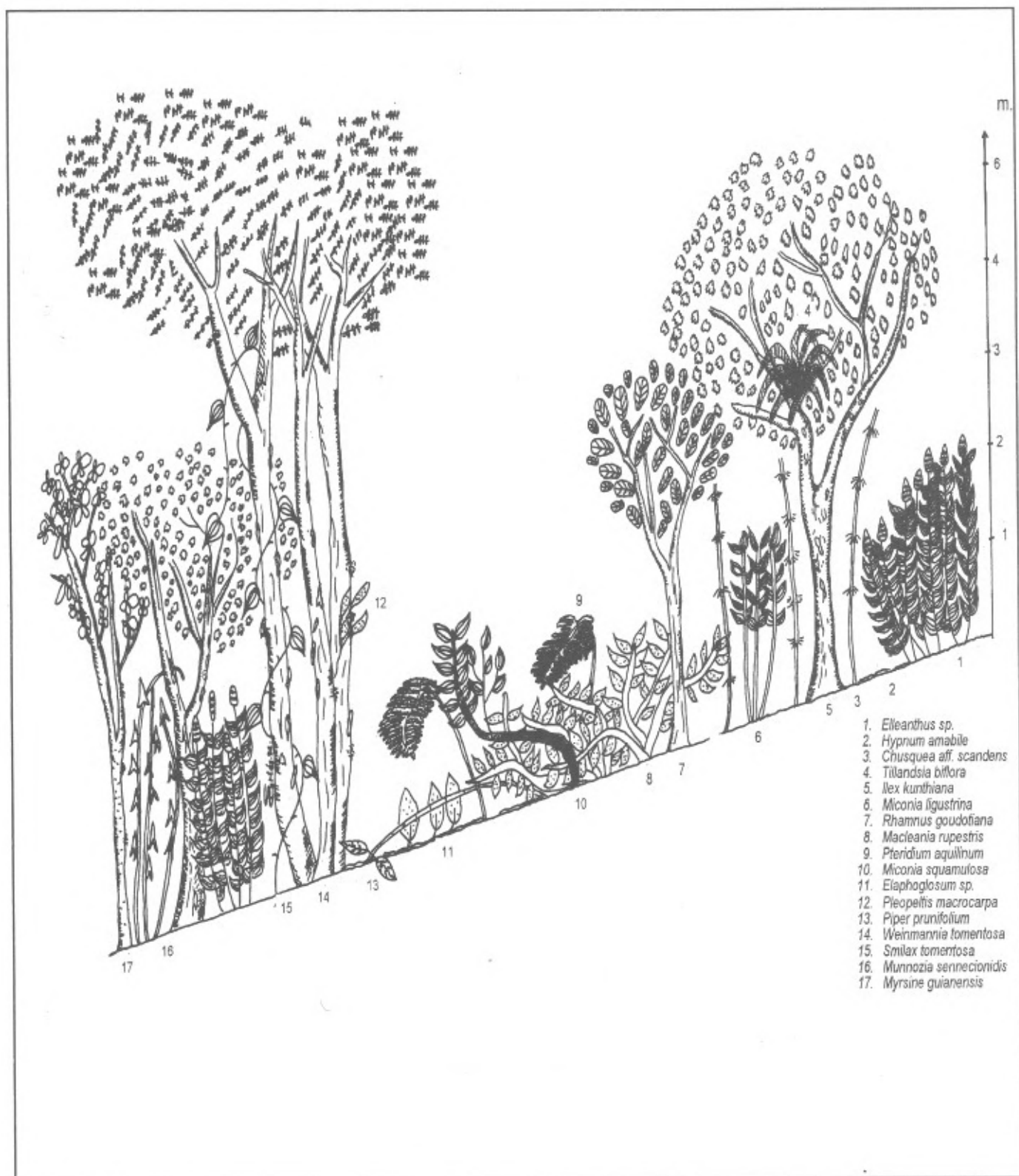


Figura 3b. Estructura y composición florística del bosque andino alto Miconio ligustrinae-Weinmannietum tomentosae

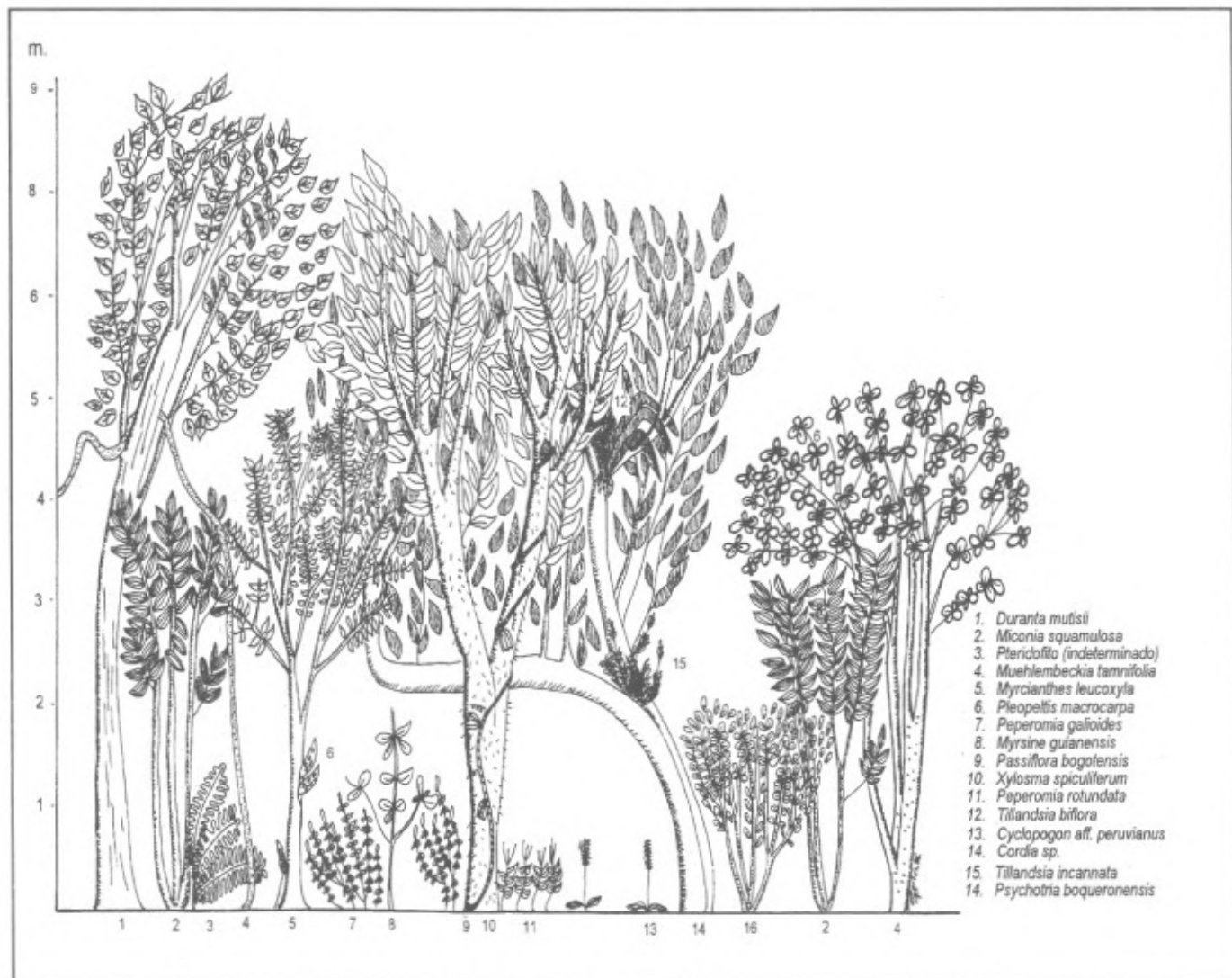


Figura 3a. Estructura y composición florística del bosque andino bajo *Daphnopsio caracasanae*-*Xylosmetum spiculiferiae*

un suelo muy delgado sobre roca (entre 5 y 15 cm), en las zonas por debajo de 2800 m, la vegetación natural sea un matorral bajo de *Baccharis rupicola* y *Dodonaea viscosa* y en las zonas por encima de este límite, un matorral rosetoso. Cuando los suelos son más espesos, su influencia sobre el tipo de vegetación aparentemente es mínima o nula.

El matorral bajo, *Baccharido rupicolae*-*Dodonaetum viscosae* (hayuelo y ciro) se presenta en la zona baja sobre suelos muy delgados pero también se establece sobre suelos bastante profundos, que originalmente deben haber tenido vegetación del bosque andino bajo.

La extensión del matorral (fase de degradación y sucesión), se relaciona con la desaparición de la fase húmica superior de los suelos. Con el inicio de la formación de hojarasca y humus, comienza también, lentamente la preparación del regreso de las especies del bosque.

En general se puede concluir que la vegetación casmófito y el matorral rosetoso están relacionados con la ausencia de suelo o con un suelo muy delgado, respectivamente.

Los datos paleoecológicos (Van Geel & Van der Hammen, 1973), muestran la posición sucesional y la relación con la deforestación del matorral de *Baccharis*

rupicola (ciro) y *Dodonaea viscosa* (hayuelo). En la época de influencia máxima de la última glaciación (20000 hasta 12500 años A.P.), la región alrededor de la laguna de Fúquene era un páramo muy seco y los suelos formados en una época interglacial anterior, habían desaparecido. Al mejorarse el clima (aproximadamente 12500 años A.P.), la temperatura alcanzó valores similares a los actuales y la precipitación igualmente aumentó, *Dodonaea viscosa* se extendió considerablemente; más tarde fue sustituida por la vegetación de robledales con *Quercus humboldtii* (roble) y especies de *Weinmannia* (encenillo), la cual alcanzó su óptimo hace 7000 años. La vegetación dominada por *Dodonaea viscosa* en extensiones considerables en las zonas cordilleranas desapareció hacia 10000 A.P., pero volvió a tomar auge y vigor durante los últimos 500 años cuando la tala del bosque y la agricultura se incrementaron (Van Geel & Van der Hammen, 1973).

En la zona de la Laguna de La Herrera, al oeste de Mosquera, los datos paleoecológicos muestran también la existencia de *Dodonaea viscosa* desde el inicio de la agricultura en la región (Van der Hammen & González, 1965). Los datos históricos registran igualmente el aumento de la erosión de los suelos junto con la deforestación y la extensión de *Dodonaea*. La vegetación con *Dodonaea viscosa* era muy escasa o estaba ausente en el área de la cuenca alta del río Bogotá durante el Holoceno antes del comienzo de la agricultura; si se presentaba, únicamente lo hacía en zonas rocosas y en las zonas más secas, y eventualmente como elemento en áreas sujetas a quemaduras naturales.

La influencia antrópica

Cerca de los bosques más conservados, existe vegetación degradada por tala, explotación de leña, quemaduras y actividad ganadera. Cuando la influencia antrópica es constante en su intensidad (estable) y persistente en el tiempo, se establecen comunidades de pastos semi-naturales y matorrales bajos. Cuando la influencia antrópica cesa, se inician cambios específicos en la composición florística y en la estructura de la vegetación, los cuales tienden hacia la recuperación del bosque maduro original. En este proceso sucesional, se pueden diferenciar fenómenos de degradación así como de influencia antrópica relativamente estable, los cuales alteran la recuperación natural. Los dos procesos son difíciles de diferenciar; así por ejemplo, un matorral alto puede interpretarse como la degradación del bosque luego de una quemadura o como una fase que sustituye al pasizal pionero y a los matorrales menos complejos.

Cuando hay degradación parcial de la vegetación original, es posible que el suelo no sufra cambios drásticos,

lo cual facilita la regeneración de la vegetación. Por el contrario cuando hay destrucción total de la vegetación original o su sustitución por potreros, el suelo puede sufrir degradación y erosión, lo cual cambia o demora la sucesión natural. En condiciones naturales (de no intervención) existen capas gruesas de humus y de hojarasca; si estas desaparecen (cuando se tala el bosque natural y es sustituido por campos de cultivo o potreros), cambian fundamentalmente las condiciones y la sucesión hacia las condiciones originales puede demorarse, ya que ahora se incluye la regeneración del suelo y de su fase húmica.

Los procesos de erosión que se originan con la deforestación, la agricultura (en zonas muy inclinadas), o las quemaduras, ocasionan la disminución del espesor de la capa de suelo que cubre la roca y en casos drásticos conducen a que se presenten afloramientos de la misma. En esta última situación, la vegetación original será sustituida por vegetación casmófito y la regeneración del bosque original por sucesión natural no será factible por un tiempo muy largo.

En la zona con vegetación del bosque andino alto también se establece el matorral rosetoso, comunidad menos cerrada que permite el crecimiento de elementos heliófilos, que en parte son plantas que abundan en la franja baja del páramo (subpáramo en el sentido de Cuatrecasas, 1958). Sobre su establecimiento hay dos probables explicaciones:

1. Se forman cuando hay claros naturales, como en las cimas o en las aristas rocosas
2. Se forman cuando hay degradación del bosque por tala, extracción de elementos leñosos o por las quemaduras, un fenómeno conocido como "paramización" (Hernández, 1997). El retorno a la vegetación boscosa por sucesión natural -si cede la influencia humana- es posible, pero demorado, ya que las condiciones de crecimiento (acción de la temperatura), en sitios elevados, están limitadas.

Mientras persista la influencia humana, continuarán presentándose los fenómenos de degradación, regresión, desaparición, erosión y paramización, al lado de la sucesión natural progresiva. La sucesión natural predominará, si cesa o disminuye considerablemente la influencia humana, como sería el caso de las condiciones que se presentan con la reglamentación de reservas naturales u otras áreas protegidas en la región.

Sucesión Natural

El curso de la sucesión natural (Fig.4), se reconstruyó tomando como punto de apoyo el aumento gradual de

la estructura y la aparición de plántulas o ejemplares jóvenes de especies de una fase más compleja en una de menor (complejidad), en la secuencia: pastizal à matorral bajo à matorral alto à bosque. Debido a que la vegetación sobre 2800 m de altitud es distinta a la que está por debajo de esta cota, se considera la sucesión como un proceso en dos líneas: una hacia bosque andino bajo y la segunda hacia bosque andino alto.

En la base del proceso, está la comunidad de los pastizales de hierba riñón y escobilla (*Dichondro repentis-Cupheetum serpyllifoliae*), que se establece sobre suelo desarrollado, en las laderas poco inclinadas, especialmente las cercanas a la base de los cerros, las cuales en algún momento fueron cultivadas, mas tarde abandonadas y posteriormente invadidas por pastos y otras especies herbáceas como *Cuphea serpyllifolia* y compuestas del género *Stevia*, que luego contribuirán al desarrollo de los matorrales bajos de ciro y hayuelo (*Baccharido rupicolae-Dodonaetum viscosae*). En esta comunidad, el grado mayor de desarrollo del suelo se relaciona con la materia orgánica aportada por la vegetación, que permite un me-

jor almacenamiento del agua de las lluvias. En estos matorrales, se han encontrado plántulas y juveniles de *Oreopanax floribundum*, *Miconia squamulosa*, *Myrsine guianensis*, *Myrcianthes leucoxylla*, *Xylosma spiculiferum* y *Psychotria boqueronensis*, que indican su importancia en la transición hacia fitocenosis más complejas como los matorrales altos de zonas localizadas por debajo de 2800 m, que a su vez conducen a tipos de vegetación con fisonomía y estructura de bosques como la asociación *Daphnopsio caracasanae-Xylosmetum spiculiferae* o bosque andino bajo (< 2800 m). Estos bosques son más vigorosos en unidades topográficas planas o levemente inclinadas, donde el suelo muestra buen desarrollo y la regeneración de la fase húmica es mas rápido. Florísticamente están relacionados con los bosques de *Cordia lanata* de Cuatrecasas (1934) y los de *Oreopanax floribundum* y *Xylosma spiculiferum* (Cleef & Hooghiemstra, 1984).

Arriba de los 2800 m se encuentra una sucesión que parece comenzar directamente en los parches de regeneración con las especies del bosque que forman primero un matorral y mas tarde un bosque de encenillo (*Miconio*

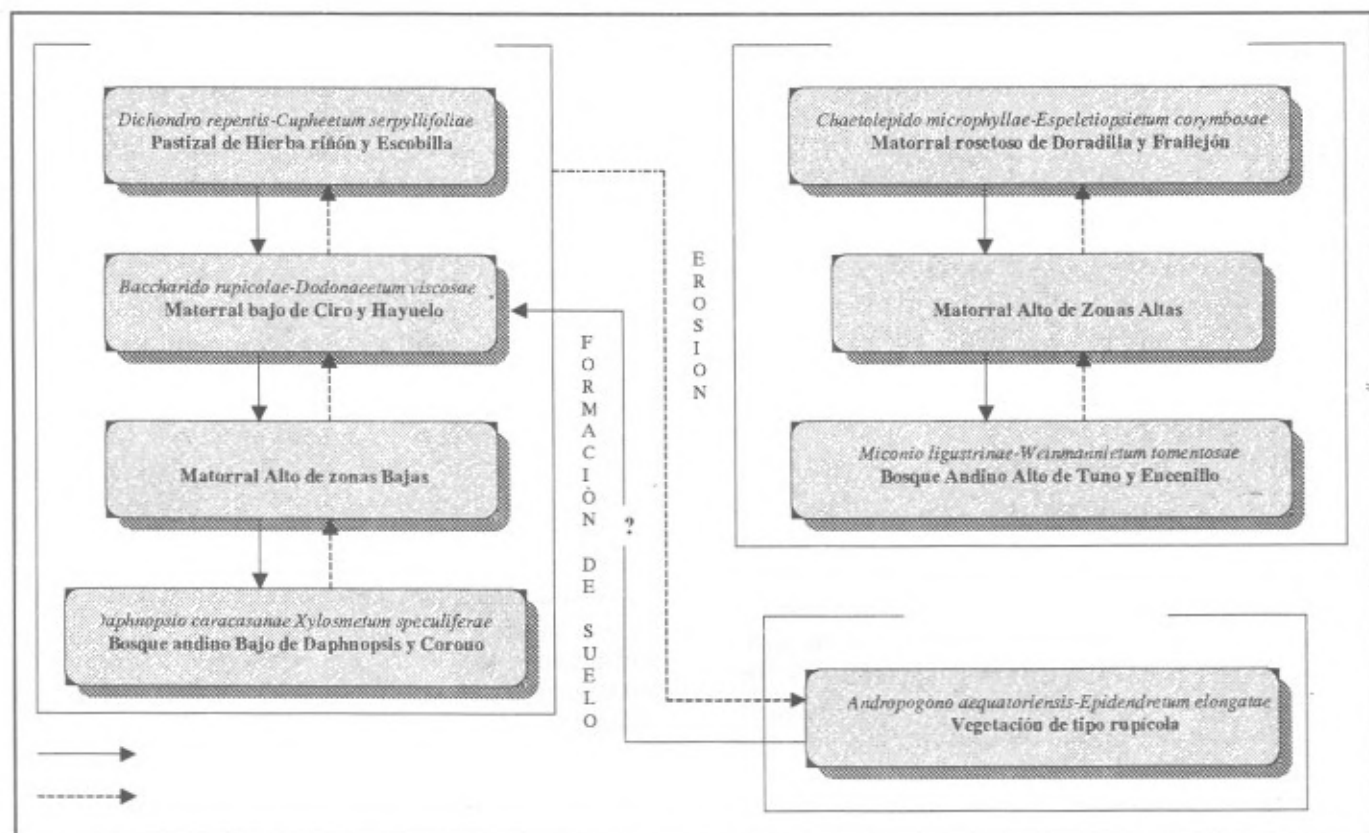


Figura 4. Relaciones dinámicas entre las comunidades vegetales de los cerros occidentales del municipio de Chía.

ligustrinae-Weinmannietum tomentosae), fitosociológicamente relacionado con el Weinmannietum tomentosae de Cuatrecasas (1934).

Algunos levantamientos de zonas por encima de 2800 m, se relacionan florísticamente con fases del matorral rosetoso (Chaetolepido microphyllae-Espeletioipsietum corymbosae); cuando los terrenos con este tipo de vegetación se queman, el matorral rosetoso aumenta su área de distribución con la posibilidad de seguir un rumbo de sucesión hacia la asociación Miconio ligustrinae - Weinmannietum tomentosae, si las influencias adversas no persisten.

La vegetación casmófito (Andropogono aequatoriensis-Epidendretum elongatae) incluye especies colonizadoras de roca (principalmente, criptógamas) que preparan y transforman el sustrato para la llegada de nuevas especies herbáceas y arbustivas que contribuyen a la formación de suelo y posteriormente confluir en una comunidad especial de matorrales bajos. En las condiciones actuales y según el tipo de roca madre que hace parte de su sustrato, la comunidad se puede considerar climácica, ya que el proceso de cambio no existe o es muy lento, especialmente en las zonas donde las pendientes son muy pronunciadas.

Conclusiones generales

Perspectivas para la restauración biológica

La vegetación y los suelos de los cerros que rodean la Sabana de Bogotá han sufrido durante siglos, degradación antrópica, especialmente en la parte baja, entre 2600 y 2700 m, donde aún persiste vegetación que no se puede llamar primaria en el sentido estricto de la palabra. Los cerros occidentales de Chía son un ejemplo de esta situación: se encuentran pastizales, fases arbustivas sucesionales y restos de vegetación boscosa secundaria. No obstante esta situación, la diversidad vegetal es alta; se registraron 350 especies, valor que se puede asociar con la presencia de los diferentes tipos de vegetación sucesional.

En cuanto a la diversidad beta o de comunidades, se encontraron ocho principales, seis de las cuales se describieron oficialmente como asociaciones entre pastizales, vegetación casmófito, matorrales y bosques que pertenecen a tres alianzas nuevas. Probablemente deben pertenecer a dos ordenes: Cupheo-Dodonaetalia y Weinmannietalia, está última se definirá de manera apropiada, cuando se tengan mas levantamientos que representen otras localidades.

Esta diversidad alfa (especies) y beta (comunidades), es alta para un área menor de 10 km² sujeta a una presión

antrópica considerable; aparentemente está influenciada por la acción semipermanente del hombre (pastizales y matorrales), pero también por la diversidad ambiental, lo cual se refleja en las diferencias pronunciadas entre la vegetación por encima de 2800 m, la de la parte baja (2600-2800 m) y la de la zona rocosa.

Por otra parte, numerosas especies animales y vegetales del bosque primario original que cubrió casi toda el área antes del hombre agricultor, deben haber desaparecido de la zona. Un peligro para la biodiversidad general, lo constituyen las plantaciones de pinos y eucaliptos que han aumentado considerablemente en los últimos años, ya que en los estratos bajos y sobre el suelo solamente crecen muy contadas especies, en algunos casos ninguna y tienen un efecto negativo sobre la economía hídrica.

La relación dinámica que debe existir entre los tipos de vegetación de la parte baja y de la parte alta, puede deberse a la sucesión natural espontánea o también a la acción antrópica. El primer caso se evidencia por la presencia de plántulas o de especímenes jóvenes de especies características de una fase con estructura mas compleja. En la parte alta puede presentarse un fenómeno de paramización relacionada con la degradación local del bosque y del matorral alto, que podría dirigirse de nuevo hacia el bosque andino si la sucesión natural continúa. En este caso, la presencia de suelo rocoso podría perpetuar la vegetación de matorral-rosetoso, ó a la vegetación casmófito (rupícola) de la parte baja que puede ser casi climácica; por tanto la situación puede ser primaria o secundaria por erosión reciente de los suelos. La acción antrópica continua y casi permanente en la parte baja, origina pastizales y matorrales bajos. Allí como en toda el área, el pastoreo extensivo, el corte de leña, y sobre todo la frecuencia de los incendios son las causas principales de la permanencia de fases sucesionales y de la degradación de fases con cierto arreglo estructural hacia otras mas simples en su estructura. Planteado de esta manera el asunto, la sucesión, la degradación y la formación o desaparición de la fase húmica de los suelos son de crucial importancia; la sucesión vegetal se desarrolla al mismo tiempo que la formación de humus sobre y en el suelo. En el caso de la degradación, los fenómenos se presentan en forma contraria. Es evidente que este hecho es más notorio en la parte baja con mayor influencia humana y menor humedad que en la parte alta, donde es más fácil la regeneración del bosque ya que numerosas especies se renuevan desde la base de los troncos quemados, después de un incendio.

La situación de los cerros estudiados es típica para numerosos cerros en la sabana, por lo tanto se justifica llegar también a algunas conclusiones sobre restauración ecológica en el área. Para volver a tener bosques nativos

plenamente climáticos, es necesario excluir la influencia antrópica (ganado, otros animales domésticos y los incendios). Solamente de esta manera se podrá conservar y con el tiempo recuperar la diversidad original.

Los bosques nativos son los mejores protectores y generadores de agua (Van der Hammen, 1998), permiten además una mejor infiltración que actúa como recarga de los acuíferos. Será necesario entonces destinar extensas áreas de los cerros especialmente por encima de 2800 m para la regeneración de este bosque. También es conveniente regenerar el bosque andino bajo (2600-2800 m). Es interesante, mantener en la parte baja, zonas con influencia antrópica ligera pero continua, especialmente en donde existen los mosaicos típicos de pastizales seminaturales y las fases sucesionales como los matorrales de ciro y hayuelo, paisajes antropizados llamativos e importantes desde el punto de vista de la biodiversidad. En esta forma se podrá alcanzar la restauración ecológica del bosque andino y la conservación de un paisaje tradicionalmente antropizado con un máximo de biodiversidad.

Agradecimientos

Este trabajo contó para su desarrollo con el apoyo académico y económico del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, del Fondo José Celestino Mutis para la protección del medio ambiente-FEN y de la Fundación ECOSABANA. Agradecemos a los especialistas de COL y de otras instituciones que colaboraron en la determinación de las colecciones: E. Linares (Briófitos), M.T. Murillo (Pteridófitos), J.L. Fernández (Labiadas y Scrophulariáceas), G. Lozano (Melastomatáceas y Solanáceas), S. Diaz P. (Compuestas), R. Callejas (HUA, Piperáceas), J. Betancur (varios grupos de Monocotiledóneas), L. E. Mora Osejo (Cyperáceas), J. Sarmiento (Orchidáceas), M. Celis (Iridáceas) y R. Jaramillo (varios grupos). En la fase de campo, contamos con la colaboración de G. Acosta, A. Cortés, J. Guevara, P. Velazco, M. Hernández .

Referencias bibliográficas

- Claro-R, F.A. 1995. Estudio Agroclimático de la cuenca Alta del Río Bogotá y del Río Ubaté-Suárez-IDEAM-Bogotá. 120 p.
- Cleef, A. M. & H. Hooghiemstra. 1984. Present vegetation of the high plain of Bogotá. In: H. Hooghiemstra: Vegetational and climatic history of the high plain of Bogotá, Colombia. Dissertations Botanicae 78:42-66. J. Cramer, Vaduz.
- Cortés-S, S.P. 1997. Contribuciones al estudio de la diversidad florística en el sector cerro Manjuy, parte baja de la cuenca del río Frío, Municipio de Chía. Trabajo de grado. Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia (inédito). Bogotá.
- Cuatrecasas, J. 1934. Observaciones Geobotánicas en Colombia. Trabajos del Museo Nacional de Ciencias Naturales. Serie Botánica 27. 143p. Madrid.
- _____ 1958. Aspectos de la vegetación natural de Colombia. Revista Acad. Colomb. Ci. Exact. 10 (40):221-268.
- Forero, E. 1965. Estudio Fitosociológico de un bosque subclimático en el altiplano de Bogotá. Trabajo de grado. Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia (inédito). Bogotá.
- Hernández-C. J. 1997. Comentarios preliminares sobre la paramización en los Andes de Colombia. Premio a la vida y obra de un científico. Publicaciones de la FEN: 42-47. Bogotá.
- Lozano, G. & J. H. Torres. 1965. Estudio fitosociológico de un bosque de robles (*Quercus humboldtii* H. & B.) de la Merced (Cundinamarca). Trabajo de grado. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia (inédito). Bogotá.
- Lozano, G. & R. Schnetter. 1976. Estudios ecológicos en el páramo de Cruz Verde. Colombia II. Las Comunidades vegetales. Caldasia 11 (54):53-68. Bogotá.
- Mc Cune, B., & M.J. Mefford. 1995. PC-ORD. Multivariate analysis of ecological data, versión 2.0. MJM Software desing, Gleneder Beach, Oregon, USA.
- Mueller Dombois, D & H. ElleMBERG. 1974. Aims and methods of vegetation ecology. John Wiley, New York, 548 p.
- Rangel-Ch, J.O. 1995a. La diversidad florística en el espacio Andino de Colombia. In: Churchill S., H. Balslev, E. Forero & J. Luteyn (eds.). Biodiversity and conservation of Neotropical Montane Forest: Pág.187-205. The New York Botanical Garden. New York.
- Rangel-Ch., J. O. & J. Aguirre-C. 1983. Comunidades acuáticas altoandinas: Vegetación sumergida y de ribera en el lago de Tota (Boyacá, Colombia). Caldasia 13 (65): 719-742. Bogotá.
- Rangel-Ch., J. O. & G. Lozano-C. 1986. Un perfil de vegetación entre La Plata (Huila) y el Volcán Puracé. Caldasia 14 (68-70): 53-547. Bogotá.
- Rangel-Ch, J. O. & H. Sturm. 1995. Consideraciones sobre la vegetación, la productividad primaria neta y la arthropofauna asociada en regiones paramunas de la cordillera oriental. En: L. E. Mora-O. & H. Sturm (eds). Estudios ecológicos del páramo y del bosque alto andino cordillera Oriental de Colombia. Acad. Colomb. Ci. Exact. Colección Jorge Alvarez Lleras N° 6: 47-70.
- Rangel-Ch, J. O. & A. Velázquez. 1997. Métodos de estudio de la vegetación. En J.O. Rangel-Ch. (ed.). Colombia Diversidad Biótica II. Instituto de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Colombia-IDEAM. 59-87. Bogotá.
- Sánchez-M., R. & J.O. Rangel-Ch. 1990. Estudios ecológicos en la cordillera Oriental Colombiana V. Análisis fitosociológicos de la vegetación de los depósitos turbosos paramunos de los alrededores de Bogotá. Caldasia 16 (77): 155-192. Bogotá.
- Sturm, H. & J.O. Rangel-Ch. 1985. Ecología de los páramos andinos: Una visión preliminar integrada. Biblioteca J. J. Triana. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 9: 292 p.
- Van der Hammen, T. 1998. Plan ambiental de la cuenca alta del Río Bogotá. Análisis de la problemática y soluciones recomenda-

- das. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, CAR .142 p.
- Van der Hammen, T. & E. González.** 1960. Upper Pleistocene and Holocene climate and vegetation of the Sabana de Bogotá (Colombia, South America). *Leidse Geologische Mededelingen* 25: 261-315.
-
- _____ 1963. Historia del clima y vegetación del Pleistoceno Superior y del Holoceno de la Sabana de Bogotá. *Boletín Geológico*, 11 (1-3):189-266.
-
- _____ 1965. A Pollen diagram from Laguna de la Herrera (Sabana de Bogotá). *Leidse Geologische Mededelingen* 32:183-191.
- Van Geel, B. & T. Van Der Hammen.** 1973. Upper Quaternary vegetational and climatic sequence of the Fuquene area (Eastern Cordillera, Colombia). *Palaeogeography, Palaeoclimatology & Palaeoecology* 14:9-92. También en *El Cuaternario de Colombia* 2.
- Vargas, O. & S. Zuluaga.** 1980. Contribución al estudio fitoecológico de la región de Monserrate. Trabajo de grado, Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia (inédito). Bogotá.
- Vargas, O. & D. Rivera.** 1990. El páramo un ecosistema fragil. Cuadernos de Agroindustria y Economía rural. Universidad Pontificia Javeriana. 25: 145-163. Bogotá.
- Vink, R. & V. Wijnjnga.** 1987. The vegetation of the semi-arid region of Herrera, Cundinamarca. Colombia. Internal report, Hugo de Vries-Laboratory University of Amsterdam.

A SIMPLE METHOD FOR ANALYZING THE TAILS OF DISTRIBUTIONS

por

Román Castañeda¹ & Juan Carlos Correa²

Resumen

Castañeda R. & J. C. Correa: A simple method for analyzing the tails of distributions. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **23**(89): 555-562. 1999. ISSN 0370-3908.

Se sabe que sus momentos caracterizan a una distribución. Usando densidades generadas por la distribución que se estudia, podemos analizar partes de la distribución original que estén sombreadas por aquellas partes con altas densidades.

Palabras clave: Momentos, colas, densidad.

Abstract

Moments are known to characterize a distribution completely. Using densities that are generated from the distribution under study we can analyze parts of the original distribution that are shadowed by those parts with high densities.

Key words: Moments, heavy tails, density.

1. Introduction

Moments we known to characterize a distribution completely. In practical situations we use at most moments up to order fourth. **Castañeda** (1993) uses a method to analyze characteristics of the tails of a symmetric distribution by using high-order moments of a bivariate distribution. The basic idea is to generate a family of distributions associated with the given distribution of the data. This family of associated distributions is generated in such a way that each member is related to the moments of the given distribution. Each of these distributions reveals characteristics in the

original distribution by given more weight to some parts of the distribution, for example, clusters or multimodality.

2. The method

Let us consider a continuous distribution with density $f(x)$ and moments with respect to the origin given by $\mu^{(k)} = E[X^k] = \int x^k f(x) dx$, $k = 1, 2, \dots$. If we are interested in analyzing some specific parts of the distribution, maybe those with low density that are shadowed by those parts with high density, then we would like to

¹ Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. A.A. 3840, Medellín, Colombia e-mail: rcastane@peseus.unalmed.edu.co

² Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. A.A. 3840, Medellín, Colombia.

give weights to $f(x)$ in a systematic way. From the moment definition the integrand is $x^{2k}f(x)$, that properly normalized is a new density function for $k = 1, 2, \dots$. The polynomial x^{2k} gives different weight to different parts of the support of the distribution. The advantage of normalizing is that the moments of these new densities are related to those of the original distribution in a simple way:

$$(1) \quad f_k(x) = \frac{x^{2k}f(x)}{\mu_{2k}}, \quad k = 1, 2, \dots$$

The random variable defined with this density has first and second moments that are related to the moments of the original distribution in the following way

$$(2) \quad \mu_1^{(k)} = \frac{\mu_{2k+1}}{\mu_{2k}} \text{ and } \mu_2^{(k)} = \frac{\mu_{2k+2}}{\mu_{2k}}$$

If we consider $\mu_1^{(1)}$, the center of the first moment-generated distribution, and we compare this moment to the first moment of the original distribution we can build a measure of displacement that will be a measure of skewness.

If we consider moments with respect to an arbitrary point, say a , we can screen some parts of the original distribution that could be producing parts with high densities in the moment-generated distributions. This happens when the original distribution is highly skewed. We can consider the moments with respect to the mode to shadow the area with the highest density quickly.

$$(3) \quad f_k(x) = \frac{(x-a)^{2k}f(x)}{\mu_{2k}}, \quad k = 1, 2, \dots$$

There is a problem when we use this procedure with highly skew distributions. The area with high density does not disappear and this does not permit us to analyze the tail where this concentration occurs. To avoid this problem a symmetrization is recommended. We can transform the data using a Box-Cox transformation.

In practice we do not know the true distribution but just a sample from that population. In that case we use a smooth estimate of the density, for example a kernel density estimate, say $\hat{f}(x)$ (Silverman, 1986). Then the associated distributions will be

$$(4) \quad f_k(x) = \frac{x^{2k}\hat{f}(x)}{\mu_{2k}}, \quad k = 1, 2, \dots$$

It is well known that if the continuous random variable X has cumulative distribution F , then $Y = F(X)$ has a uniform distribution between 0 and 1. Thus the transformation $W = 2Y - 1$ has uniform distribution between -1 and 1. If we consider the polynomials x^k ,

with $k = 1, 2, \dots$, we have that the sequence of polynomials goes to zero everywhere except at -1 and 1 as $k \rightarrow \infty$ in the interval $[-1, 1]$. Thus they give weights to the tails in a systematic way. The central part of the support receives less weight when the grade of the polynomial increases. In a practical situation what we do is the following: We have our sample x_1, x_2, \dots, x_n . Let $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n)}$ be the order statistics. Then define

$$(5) \quad y_{(i)} = 2 \left(\frac{x_{(i)} - x_{(1)}}{x_{(n)}} \right) - 1.$$

Then the data will be in the range -1 to 1.

3. The bivariate case

Let $f(x, y)$ be a two-dimensional pdf with support given by R . The (m, n) -moment will be defined by

$$(6) \quad M_{mn} = \int_R \int x^m y^n f(x, y) dx dy$$

m and n are non-negative integers. The sum $m + n$ determines the order of the moment. There are $m + n + 1$ moments of order $m + n$. It is well known that the first order moments M_{01} and M_{10} specify the position of the center of mass of the distribution. Let us assume that the condition $M_{10} = M_{01} = 0$ holds, i.e. the origin of the coordinates will be attached at the center of mass of the distribution. In practical situations R is a rectangular area, say $4AB$, centered at the center of mass of the distribution. We introduce the reduced coordinates

$$(7) \quad z = \frac{x}{A}, \quad w = \frac{y}{A}$$

to scale the region R onto the interval $(-1, 1) \times (-1, 1)$ and define the centered reduced moments of the distribution by

$$(8) \quad \mu_{mn} = \frac{M_{mn}}{A^{m+1} + B^{n+1}} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 z^m w^n p(z, w) dz dw.$$

The reduced centered moments are dimensionless and they become comparable with each other. Note that $|z|^m \geq |z|^{m+1}$, $|w|^n \geq |w|^{n+1}$ in $(-1, 1) \times (-1, 1)$. As a consequence the polynomials z^m and w^n will enhance certain portions of the distribution depending on m and n .

Let us define the associated density functions by

$$(9) \quad V_k(z, w) = \frac{(z^2 + w^2)^k}{\sum_{j=0}^k \mu_{2(k-j), 2j}} p(z, w),$$

where $k = 1, 2, \dots$ denotes the order of the function and $z^2 + w^2 = r^2$ is the squared distance between the center of mass of the distribution and an arbitrary point

(z, w) in its domain. Note that $V_0(z, w) = p(z, w)$ but for $k > 0$ the coefficient of $V_k(z, w)$ weights the values of the distribution radially, in such a way that the values of the distribution around the center will be nullified whereas the values far from it will be enhanced. Thus, each associated density function refers to a specific zone of the original distribution. It allows to perform a precise evaluation of the distribution by segmentation.

The geometrical parameters of each associated pdf (i.e position of the center of mass, length and orientation of semiaxis, eccentricity) are used as quantitative descriptors of the structure of the respective zone. The moments, denoted by $\mu_{mn}^{(k)}$, are determined through the following combinations of the centered reduced moments of the original distribution,

$$(10) \quad \mu_{01}^{(k)} = \frac{\sum_{j=0}^k \binom{k}{j} \mu_{2(k-j),2j+1}}{\sum_{j=0}^k \binom{k}{j} \mu_{2(k-j),2j}}$$

$$(11) \quad \mu_{10}^{(k)} = \frac{\sum_{j=0}^k \binom{k}{j} \mu_{1+2(k-j),2j}}{\sum_{j=0}^k \binom{k}{j} \mu_{2(k-j),2j}}$$

$$(12) \quad \mu_{02}^{(k)} = \frac{\sum_{j=0}^k \binom{k}{j} \mu_{2(k-j),2(j+1)}}{\sum_{j=0}^k \binom{k}{j} \mu_{2(k-j),2j}}$$

$$(13) \quad \mu_{20}^{(k)} = \frac{\sum_{j=0}^k \binom{k}{j} \mu_{2(1+k-j),2j}}{\sum_{j=0}^k \binom{k}{j} \mu_{2(k-j),2j}}$$

$$(14) \quad \mu_{11}^{(k)} = \frac{\sum_{j=0}^k \binom{k}{j} \mu_{2(k-j)+1,2j+1}}{\sum_{j=0}^k \binom{k}{j} \mu_{2(k-j),2j}}$$

$\mu_{01}^{(k)}$ and $\mu_{10}^{(k)}$ specify the position of the center of mass of $V_k(z, w)$ respective to the center of mass of the original distribution. However, to determine the other geometrical parameters of $V_k(z, w)$ we define a new coordinate

system with the origin at its center of mass and the axis parallel to its semiaxis respectively, i.e. the proper coordinate system of $V_k(z, w)$. First we calculate the moments with respect to the proper coordinate origin by means of the formula

$$(15) \quad \eta_{01}^{(k)} = \sum_{l=0}^m \sum_{j=0}^n (-1)^{k+j} \binom{m}{l} \binom{n}{j} z_{k0}^l w_{k0}^j \mu_{ml,n-j}^{(k)}$$

So we obtain

$$(16) \quad \begin{bmatrix} \eta_{01}^{(k)} \\ \eta_{10}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$(17) \quad \begin{bmatrix} \eta_{02}^{(k)} \\ \eta_{11}^{(k)} \\ \eta_{20}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{02}^{(k)} \\ \mu_{11}^{(k)} \\ \mu_{20}^{(k)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \left(\mu_{01}^{(k)}\right)^2 \\ \mu_{01}^{(k)} \mu_{10}^{(k)} \\ \left(\mu_{10}^{(k)}\right)^2 \end{bmatrix}$$

Note that $\eta_{nm}^{(0)} = \mu_{nm}^{(0)} = \mu_{nm}$, with $n + m = 1, 2$. Now, the new second order moments are calculated in the proper coordinate system, whose axis are rotated an angle

$$(18) \quad \varphi_k = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2\eta_{11}^{(k)}}{\eta_{20}^{(k)} - \eta_{02}^{(k)}} \right)$$

with respect to the original ones. There is an ambiguity in the tilt angle φ_k which could be solved in the same way as Teague (1980), by choosing φ_k always to be the angle between the x-axis and the semimajor axis a_k , i.e. $a_k \geq b_k$, and taking into account that

$$(19) \quad -\frac{\pi}{2} \leq \arctan x \leq \frac{\pi}{2}, \quad x = \frac{2\eta_{11}^{(k)}}{\eta_{20}^{(k)} - \eta_{02}^{(k)}}$$

With these conventions we arrive at the results for the tilt angle that are given in Table I.

TABLE I

$\eta_{20}^{(k)} - \eta_{02}^{(k)}$	$\eta_{11}^{(k)}$		φ_k
Zero	Zero		0^0
Zero	Positive		$+45^0$
Zero	Negative		-45^0
Positive	Zero		0^0
Negative	Zero		-90^0
Positive	Positive	$\frac{1}{2} \arctan x$	$0^0 < \varphi_k < 45^0$
Positive	Negative	$\frac{1}{2} \arctan x$	$-45^0 < \varphi_k < 0^0$
Negative	Positive	$\frac{1}{2} \arctan x + 90^0$	$45^0 < \varphi_k < 90^0$
Negative	Negative	$\frac{1}{2} \arctan x + 90^0$	$-90^0 < \varphi_k < -45^0$

Introducing the usual rotation of coordinates by φ_k we obtain

$$(20) \quad \begin{bmatrix} \eta_{02}'^{(k)} \\ 0 \\ \eta_{20}'^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \varphi_k & 2 \cos \varphi_k \sin \varphi_k & \sin^2 \varphi_k \\ -\cos \varphi_k \sin \varphi_k & \cos^2 \varphi_k & \cos \varphi_k \sin \varphi_k \\ \sin^2 \varphi_k & -2 \cos \varphi_k \sin \varphi_k & \cos^2 \varphi_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\mu_{01}^{(k)})^2 \\ \eta_{02}^{(k)} \eta_{11}^{(k)} \\ (\eta_{20}^{(k)})^2 \end{bmatrix}$$

4. Examples

To illustrate the above ideas we present several examples. Let us consider the data about the cost of health services provided by the university health department to its employees. The distribution is highly skewed as is shown by its estimate in Figure 1a. The first moment distribution is shown in Figure 1b. The first-moment-with-respect-to-the-mode density estimate is shown in Figure 1c.

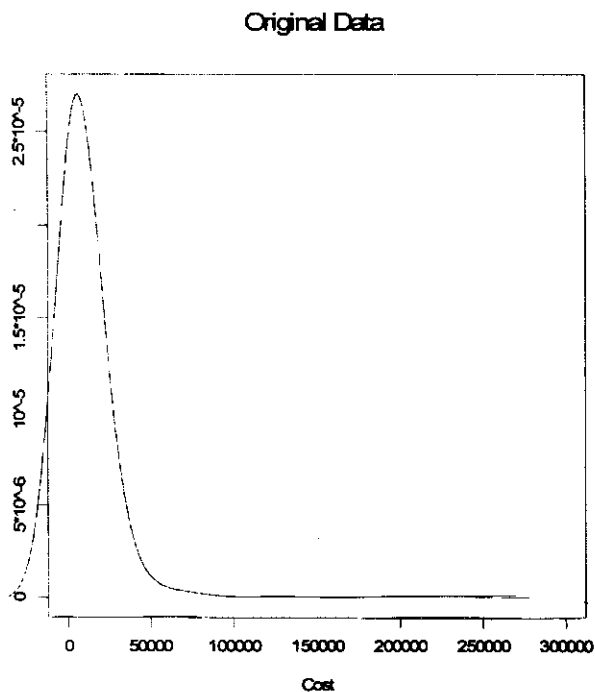


Figure 1 (a)

The most of the services required by users at the health department are nonexpensive check-outs for well-known diseases such as colds, simple headaches, and so on, or small accidents. However a small fraction of the requirements are related with more expensive problems: heart problems, etc.

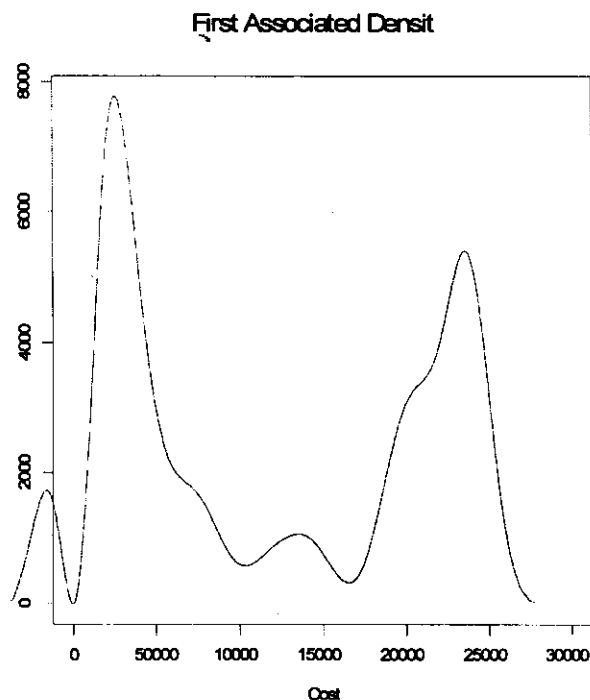


Figure 1 (b)

We can see how the high-density part has disappeared and others parts start appearing showing multimodality. This behavior has a logical explanation for this problem.

The next univariate example shows a normal distribution. The associated distributions are bimodal. The higher the grade of the associated distribution, the further apart the modes are. The relations between the main distribution and its associated distributions give us new measures of skewness, for example the difference between the means of the main and the first associated

distributions (Figs. 2a-2d). In Figure 2b we observe a third mode on the right. The explanation for this mode is that the random generator mechanism for the normal distribution has problems generating values from the tails. This is a common problem with random number generators.

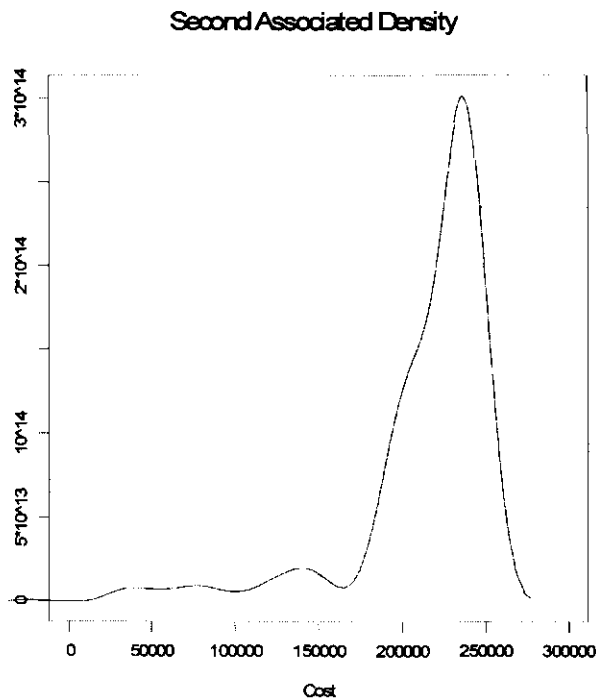


Figure 1 (c)

The next example is important in optics. It is well known that PSFs (Point Spread Functions) have complete information of the imaging properties of optical systems. They are defined as the intensity distribution in the image plane of the system when the object is deltalike (Teague, 1980). PSFs of diffraction limited systems are rotation symmetric and about 84% of the energy is concentrated in the Airy disc. System aberrations change this symmetry and/or this energy distribution. Therefore a precise evaluation of image quality can be obtained from the quantitative analysis of both the symmetry and the energy distribution of the PSFs. Associated density functions are introduced to perform the analysis of the central disc and the ring structure of the PSF separately. The geometrical parameters of those functions are determined from the centred reduced moments of the PSF and are used as symmetry descriptors. Thus, aberration types can be characterized using

descriptors, which are determined directly from experimental data.

Third Associated Densit

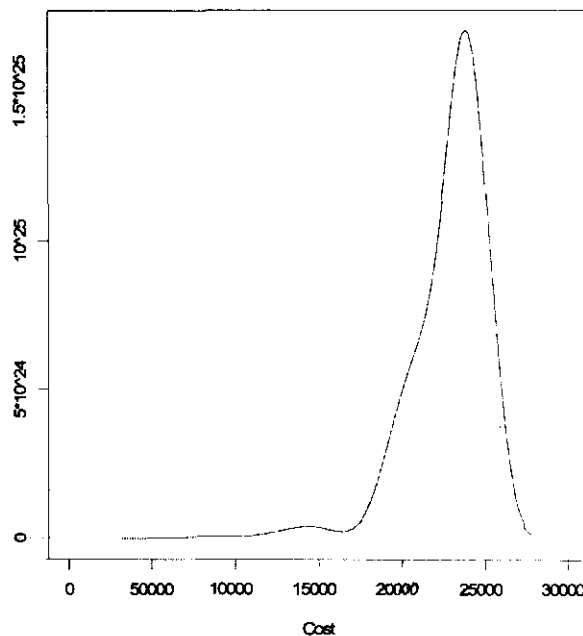


Figure 2 (a)

Measured PSFs of many systems of interest, such as microscope lenses, consist in an intensity peak surrounded by a ring structure. Up a finite distance from the peak their intensity values will be immersed into the background noise of the detector and can be neglected. In this work we only concern on this class of PSFs.

Let us assume that the energy content of the PSF into the region R around its intensity peak determined by such a distance is equal one. Thus, the PSF can be interpreted as a real density function, whose symmetry and energy distribution can be described using their moments (Marathay, 1982), which are defined as (6).

We will introduce reduced coordinates to scale the region R onto the interval $(-1, 1)$ and to obtain dimensionless centred reduced moments (8). Furthermore, to evaluate the symmetry and the energy content of the PSF it is useful to introduce associated density functions (9). If the system is diffraction limited, the associated density functions will determine two concentric isotropic zones. Figs. 3a-3b show these zones for the on-axis PSF of a microscope lens $60 \times /0.80$ at wavelength of 589nm.

But aberrations introduce geometrical variations of the zones. Fig. 5 shows the zones for an off-axis PSF of a microscope lens $40 \times /0.65$ at wavelength of 486nm. The geometrical parameters of the associated density functions (i.e. position of centers of mass, length and orientation of the semi-axis, eccentricity) will be used as quantitative descriptors of the symmetry and energy distribution of the zones.

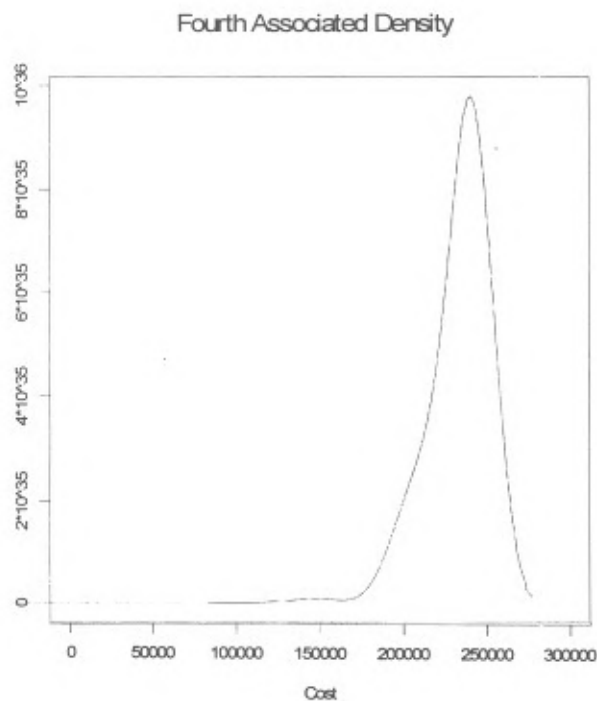


Figure 2 (b)

If the system is diffraction limited, the associated density functions will determine two concentric isotropic zones. Figs. 3a-3b show these zones for the on-axis PSF of a microscope lens $60 \times /0.80$ at wavelength of 589nm.

But aberrations introduce geometrical variations of the zones. Fig. 5 shows the zones for an off-axis PSF of a microscope lens $40 \times /0.65$ at wavelength of 486nm. The geometrical parameters of the associated density functions (i.e. position of centers of mass, length and orientation of the semi-axis, eccentricity) will be used as quantitative descriptors of the symmetry and energy distribution of the zones.

Using V_0 we analyze the central disc of the PSF principally, i.e. a zone that includes the center of mass of

the PSF and its surroundings but does not coincide with the Airy disc of the PSF in general (Figs. 3a and 4a inside the rectangle). Its geometrical parameters are determined by the centred reduced moments up to the second order.

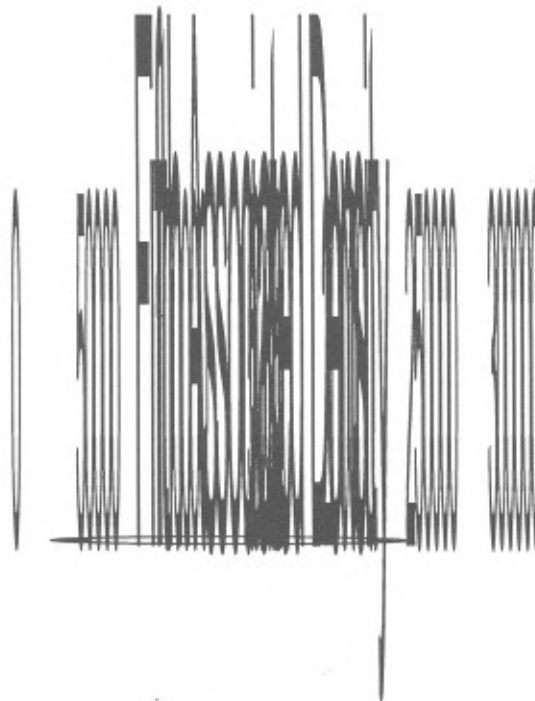


Figure 2 (c)

The semiaxis of V_0 are oriented at an angle φ_0 (18). Introducing the usual rotation of coordinates by this angle for $m + n = 2$ in eq.(20), we obtain new centred reduced moments of second order. The length of the semiaxis and the eccentricity of V_0 can be expressed by

$$(21) \quad a_0 = \sqrt{\frac{\mu_{20}^i}{\mu_{00}^i}}, \quad b_0 = \sqrt{\frac{\mu_{02}^i}{\mu_{00}^i}}$$

$$(22) \quad E_0 = \sqrt{1 - \left(\frac{b_0}{a_0}\right)^2} = \sqrt{1 - \frac{\mu_{02}^i}{\mu_{00}^i}}$$

respectively. We assume that $a_0 \geq b_0$, so that $0 \leq E_0 < 1$. For rotation symmetrical V_0 we have $\varphi_0 = 0, E_0 = 0, a_0 = b_0 = R_0$. R_0 denotes the reduced radius of the central disc of the PSF, which takes its minimum value for diffraction limited systems.

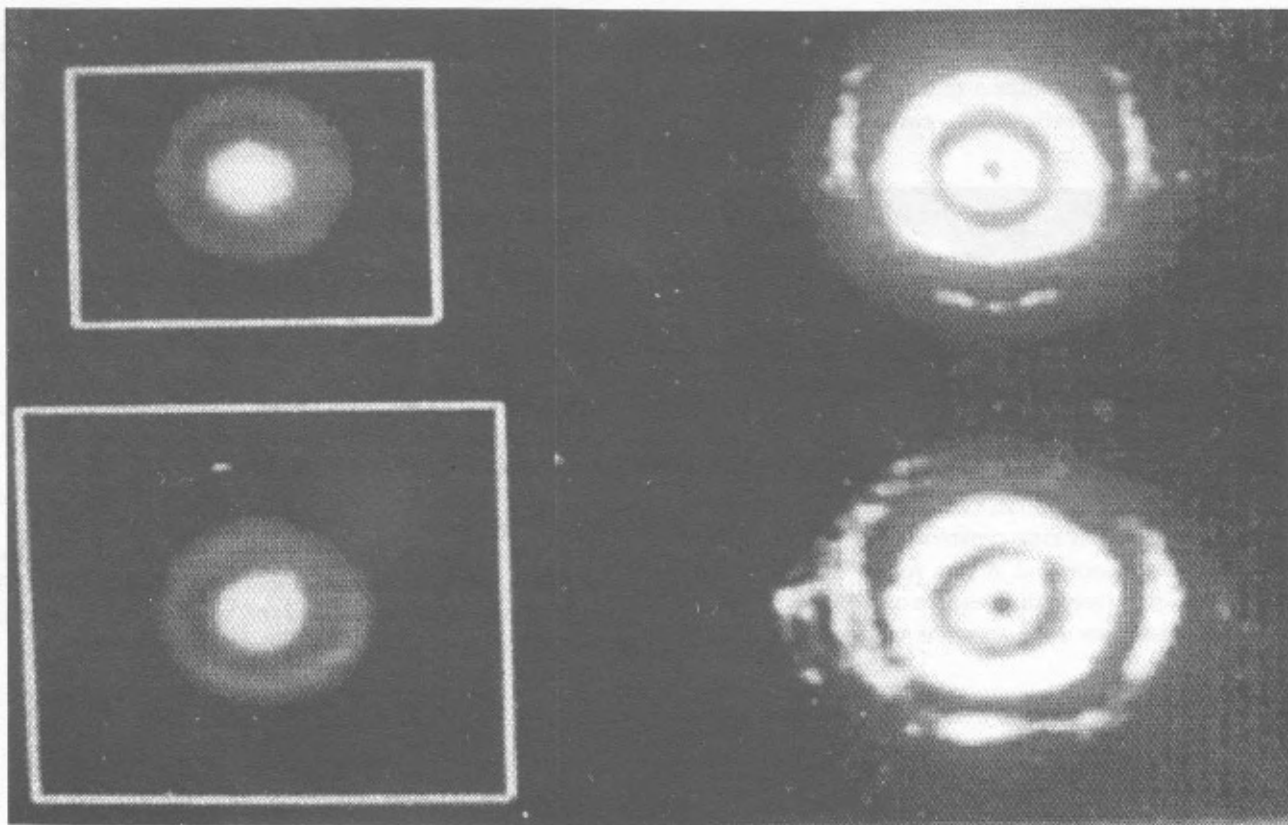


Figure 3

Rotation symmetrical aberrations (i.e. spherical aberration, defocus, curvature of field) increase the value of R_0 but do not change the symmetry of V_0 . In presence of non rotation symmetrical aberrations (i.e. astigmatism, coma) the central disc will be not rotation symmetric but its mean-square radius will be

$$(23) \quad \epsilon_0^2 = \frac{1}{2} (a_0^2 + b_0^2) .$$

If we regard $b_0 \geq 0.9a_0$ as permissible for rotation symmetry, we obtain $E_0 \geq 0.44$ as a tolerance.

Using V_1 we concern with the zone that excludes the center of mass of the PSF and its neighborhood and includes the ring structure of the PSF near the central disc (Figs. 3b and 4b right). Its geometrical parameters will be determined by the centred reduced moments of third and fourth orders. The semiaxis of are oriented at an angle φ_1 , which is given by (18) for $k = 1$.

Let us introduce the rotation of coordinates by for $m + n = 3, 4$ in eq. (8) to obtain new centred reduced moments of third and fourth orders (with primes). As expected, we obtain $\mu'_{13} = \mu'_{31} = 0$. The coordinates

(Z_1, W_1) of the center of mass, the length of the semi-axis and the eccentricity are given by

$$(24) \quad Z_1 = \frac{\mu'_{30} + \mu'_{12}}{\mu'_{02} + \mu'_{20}}, \quad W_1 = \frac{\mu'_{03} + \mu'_{21}}{\mu'_{02} + \mu'_{20}},$$

$$(25) \quad a_1 = \sqrt{\frac{\mu'_{40} + \mu'_{22}}{\mu'_{02} + \mu'_{20}}}, \quad a_1 = \sqrt{\frac{\mu'_{04} + \mu'_{22}}{\mu'_{02} + \mu'_{20}}},$$

$$(26) \quad E_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{b_1}{a_1}\right)^2} = \sqrt{1 - \frac{1 + \mu'_{04}/\mu'_{22}}{1 + \mu'_{40}/\mu'_{22}}}$$



Figure 4

Centers of mass, lengths of semiaxis and eccentricities are rotation invariants. Thus, the geometrical parameters of and are independent in the sense that they are functions of centred reduced moments of different orders.

The vector $\vec{Q} = \vec{Z}_1 + \vec{W}_1$ represents the shift of the center of mass of V_1 with respect to the center of mass of V_0 and thus, it constitutes a descriptor for coma. Indeed, we will call the ratio $|\vec{Q}|/\epsilon_0$ coma factor.

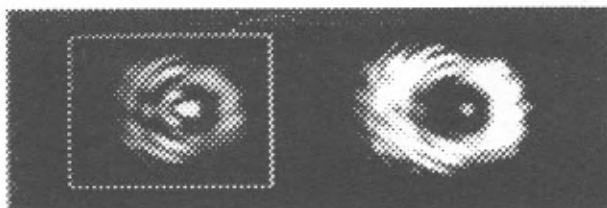


Figure 5

If V_1 is rotation symmetric we have $\varphi = 0$, $\vec{Q}_1 = 0$, $a_1 = b_1 = R_1$, $E_1 = 0$. In this case the zone relative to V_1 will be a circular ring centred in the center of mass of the PSF. Its minor and major reduced radii will be R_0 and R_1 respectively. In presence of rotation symmetrical aberrations this zone remains concentric with the

central disc but the value of R_1 will increase. For non rotation symmetrical aberrations the geometry of the PSF can be very complicated because the centers of mass, the eccentricities and the axis orientation of V_0 and V_1 can be different. However, if we regard $|\vec{Q}|/\epsilon_0 \leq 0.2$ as permissible for coma free systems, we can define a mean circular ring of minor radius ϵ_0 and major radius

$$\epsilon_1 = \sqrt{\frac{1}{2}(a_0^2 + b_0^2)}.$$

References

- [1] Castañeda, R., *Two-Dimensional Evaluation of Point Spread Functions Using Centred Reduced Moments*, Pure Appl. Opt. **3** (1994), 737-755.
- [2] Marathay, A., *Elements of optical coherence theory*, John Wiley & Sons, New York, 1982, p. 232.
- [3] Silverman, B. W., *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*, Chapman and Hall, London, 1986, 1980.
- [4] Teague, M., *Image analysis via the general theory of moments*, J. Opt. Soc. Am. **70** (1980), 920-930.

TODOS LOS CAMINOS CONDUCEN A PAUL ERDÖS*

por

Rodrigo De Castro¹, Jerrold W. Grossman²

Resumen

R. D Castro & J. W. Grossman: Todos los caminos conducen a Paul Erdős. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 23(89):563-582, 1999. ISSN 0370-3908.

La noción de número de Erdős ha estado presente en la comunidad matemática por más de treinta años como una manera de cuantificar el hecho de que la investigación científica se ha convertido durante el siglo XX en un proceso colaborativo, no siendo ya simplemente una actividad realizada por individuos aislados. En este artículo exploramos algunos caminos de colaboración (relativamente cortos) que pueden seguirse desde Paul Erdős hasta investigadores dentro y fuera de las matemáticas. En particular, hemos determinado que todos los ganadores de la Medalla Fields, hasta el año 1998, tienen un número de Erdős menor que 6 y que más de 60 premios Nobel de física, química, economía o medicina tienen un número de Erdős número que 9.

Palabras clave: Colaboración, número de Erdős, Medalla Fields, premio Nobel, investigación científica.

Abstract

The notion of Erdős number has floated around the mathematical research community for more than thirty years, as a way to quantify the common knowledge that mathematical and scientific research has become a very collaborative process in the twentieth century, not an activity engaged in solely by isolated individuals. In this paper we explore some (fairly short) collaboration paths that one can follow from Paul Erdős to researchers inside and outside of mathematics. In particular, we find that all the Fields Medalists up through 1998 have Erdős numbers less than 6, and that over 60 Nobel prize winners in physics, chemistry, economics, and medicine have Erdős numbers less than 9.

Key words: Collaboration, Erdős number, Fields Medal, Nobel prize, scientific research.

* Este artículo es la versión en español (aumentada y actualizada) del artículo *Famous trails to Paul Erdős* por Rodrigo De Castro y Jerrold W. Grossman, publicado en *The Mathematical Intelligencer* 21 (1999), 51-63. Autorización para la publicación de esta traducción ha sido otorgada por el Editor de *Intelligencer*, Dr. Chandler. Davis.

1 Departamento de Matemáticas y Estadística, universidad Nacional de Colombia, Bogotá. e-mail: rdcastro@matematicas.unal.edu.co. Web: www.matematicas.unal.edu.co/rdcastro/rdc.html/.

2 Department of Mathematics and Statistics, Oakland University, Rochester, Michigan, USA. e-mail: grossman@oakland.edu. Web: www.oakland.edu/~grossman/.

1. Una componente destacada del grafo de colaboración

Los vértices del grafo de colaboración C son todos los investigadores (vivos o muertos) en todas las disciplinas académicas, con una arista entre los vértices u y v si u y v han publicado conjuntamente un artículo o un libro de investigación (posiblemente con más co-autores). Como sucede en cualquier grafo simple (no dirigido), en C hay una noción de distancia entre dos vértices u y v : $d(u, v)$ es el número de ejes de la trayectoria más corta entre u y v , si tal trayectoria existe, ∞ en cualquier otro caso (se asume que $d(u, u) = 0$).

Para el presente artículo nos interesa el subgrafo de colaboración centrado en PAUL ERDŐS (1913–1996). Si v es un investigador arbitrario, el número $d(\text{PAUL ERDŐS}, v)$ se llama el número de Erdős de v . Esto quiere decir que el propio PAUL ERDŐS tiene número de ERDŐS 0, y sus co-autores tienen número de ERDŐS 1. Quienes no tienen número de ERDŐS 0 o 1, pero han publicado con alguien cuyo número de ERDŐS es 1, tienen número de ERDŐS 2, y así sucesivamente. Quienes no están conectados de esta manera con PAUL ERDŐS tienen número de ERDŐS ∞ . El conjunto de todos los individuos con número de ERDŐS finito constituye la componente de Erdős de C .

La componente de ERDŐS de C sobrepasa por su asombroso tamaño y por la manera como sus miembros (vértices) se aglomeran alrededor de ERDŐS. Más de 500 personas tienen número de ERDŐS 1 y más de 5600 tienen número de ERDŐS 2. En la historia de la publicación académica en matemáticas, nadie ha estado cerca de igualar el número de colaboradores que PAUL ERDŐS tuvo en vida, ni el número total de artículos investigativos que publicó (más de 1500, casi el 70% de los cuales fueron trabajos conjuntos). Con su muerte en 1996, el hombre que inspiró tantas ideas matemáticas se “alejó” —para usar su propia terminología— pero su leyenda ha revivido (véanse, como ilustración de este fenómeno, dos biografías recientes [107], [152]). Y parte de esta leyenda, dentro y fuera del mundo matemático, se ha perpetuado con la noción de ‘número de Erdős’.

La primera mención explícita en la literatura del ‘número de ERDŐS’ parece ser [85], donde se afirma que este “pasatiempo” fue ajeno al propio ERDŐS durante mucho tiempo. Pero el primer estudio sistemático de la componente de ERDŐS de C fue realizado por el segundo autor en [92] y [94], labor que continúa en la página Web, *The Erdős Number Project*, [89]. Este sitio en Internet contiene la lista de todos los individuos con

número de ERDŐS 1 (actualmente 505) y sus respectivos co-autores con número de ERDŐS 2 (actualmente 5608). Los archivos (disponibles también por vía de anonymous ftp [90]) se actualizan anualmente.

Se ha conjeturado que la mayoría de los científicos tienen un número de ERDŐS finito pero, de hecho, no se ha exhibido evidencia suficiente para apoyar tal aseveración. En [48] el primer autor proporcionó información y nexos adicionales, y el presente artículo pretende indagar más a fondo la cuestión. Consultando numerosas fuentes bibliográficas hemos encontrado que muchos e importantes investigadores en múltiples áreas académicas —diferentes de las matemáticas propiamente dichas— tales como física, química, cristalografía, economía, finanzas, biología, medicina, biofísica, genética, meteorología, astronomía, geología, ingeniería aeronáutica, ingeniería eléctrica, ciencias de la computación, lingüística, psicología y filosofía, tienen en realidad números de ERDŐS finitos. En la sección 2 presentamos esas sugestivas conexiones. No se puede inferir de esto, por supuesto, que todas las personas cuyas áreas de especialización son las mencionadas disciplinas, u otras relacionadas, tienen necesariamente un número de ERDŐS finito. Pero los nombres que primero aparecen cuando se llevan a cabo búsquedas relativamente simples resultan ser algunos de los más conspicuos y prolíficos representantes de sus respectivos campos (incluyendo más de 60 premios Nobel), la mayoría de los cuales han tenido incontables colaboradores a través de los años. Llegamos entonces a la tentadora conclusión de que la gran mayoría de investigadores en esos campos de especialización, excepto quienes trabajan en aislamiento completo, tienen probablemente un número de ERDŐS finito.

La última afirmación es difícil de poner a prueba exhaustivamente cuando se incluyen *todas* las disciplinas académicas o científicas, por lo que debe considerarse como una hipótesis audaz —aunque plausible. Si nos restringimos a los autores que publican investigaciones en *matemáticas* la siguiente conjetura

$$(\mathcal{E}) \left\{ \begin{array}{l} \text{la mayoría de los investigadores del siglo} \\ \text{XX, en matemáticas, tienen un número de} \\ \text{Erdős finito (y relativamente pequeño)} \end{array} \right.$$

parece obvia y ha sido considerada como parte del folklore. Pero la evidencia se reduce a enfatizar el gran número de co-autores (más de 500) de ERDŐS y el abultado número de co-autores de éstos (más de 5600). Puesto que sus áreas de investigación son numerosas y variadas, (\mathcal{E}) debería ser verdadera.

Nos proponemos exhibir evidencia más concreta y concluyente en favor de (\mathcal{E}) . Para tal propósito, seleccionamos primero una muestra bastante “lujosa” de la comunidad investigativa en matemáticas, a saber, los ganadores de las más prestigiosas distinciones en esta disciplina académica: la Medalla Fields, el premio Steele, el premio Wolf en matemáticas y el premio Nevanlinna. Cruzando múltiples referencias bibliográficas hemos determinado que todos los ganadores de estos premios tienen números de ERDŐS ≤ 5 . En las secciones 3 y 4 aparecen las tablas completas con las cotas superiores de estos números de ERDŐS³. Los correspondientes grafos de colaboración, en los que se conecta a los laureados con PAUL ERDŐS, se encuentran desplegados con todo detalle, para los lectores interesados, en el sitio *Web* [89]. Los individuos que aparecen en estas exclusivas listas de galardonados son matemáticos de primer orden que se caracterizan por ser originales, prolíficos e influyentes; la mayoría han tenido muchos discípulos, colaboradores y estudiantes de doctorado bajo su supervisión. Su impacto o influencia no se ha limitado a una única institución o incluso a un único país o época histórica (el mismo PAUL ERDŐS fue honrado con el premio Wolf en 1983–84). Además, las distinciones citadas se confieren sin exclusión de áreas de investigación (exceptuando el premio Nevanlinna, que está restringido a las ciencias de la computación). No es entonces sorprendente que la red de colaboración alrededor de estos nombres colosales resulte ser muy densa. El hecho de que todos ellos estén incluidos en la componente de ERDŐS de C resulta evidencia decisiva en favor de (\mathcal{E}) .

Daremos luego dos pasos más: en la sección 5 rastreamos los tópicos de artículos publicados por algunos investigadores cuyo número de ERDŐS es pequeño, y buscamos ramificaciones en otras disciplinas académicas. Esto nos dará una idea más concreta sobre la cobertura y el alcance que la “conexión ERDŐS” tiene dentro y fuera de las ciencias matemáticas. Finalmente, en la sección 6 planteamos algunas preguntas abiertas. Obviamente, cualquier empresa de esta envergadura es —y seguirá siendo— incompleta; admitimos, por ejemplo, que no hemos logrado conectar a los más recientes ganadores del premio Nobel de física.

Por brevedad, decimos que una persona es ERDŐS- n si su número de ERDŐS es n . Así, los co-autores de ERDŐS son ERDŐS-1 y los co-autores de éstos (que no

son ERDŐS-1 o ERDŐS-0) son ERDŐS-2. La lista [90], que contiene todos los individuos que son ERDŐS-2 y sus respectivos co-autores ERDŐS-1, es llamada la *lista Erdős-2*.

2. Conexiones interesantes

Sin pretender ser 100% exhaustivos, hemos examinado varias bases de datos bibliográficas y semblanzas históricas ([2], [31], [32], [100], [109], [110], [121], [124], [133], [164], [165]), así como un sinnúmero de sitios en Internet, y hemos descubierto que algunos pensadores y científicos muy notables, provenientes de las más variadas ramas académicas, están conectados con PAUL ERDŐS en el grafo de colaboración C .

Los siguientes ejemplos proporcionan —de paso— una vista panorámica de la colaboración académica, aspecto de la investigación científica esencial en el siglo XX, pero que no ha sido sistemáticamente tratado en la literatura.

• ALBERT EINSTEIN tiene número de ERDŐS 2 en razón de los dos artículos que publicó con el matemático alemán ERNST G. STRAUS quien fue su asistente en Princeton en el periodo 1944–48. STRAUS publicó con ERDŐS 20 artículos (el primero de ellos en 1953)⁴. EINSTEIN publicó trabajos conjuntos con cerca de 25 colaboradores (véase [140]), entre ellos los premios Nobel de física WOLFGANG PAULI y OTTO STERN.

A la temprana edad de 20 años, PAULI había sorprendido al mundo científico con su brillante artículo enciclopédico de 200 páginas sobre la teoría de la relatividad, exposición de la que EINSTEIN escribió una elogiosa reseña. No es por ello sorprendente que el artículo conjunto escrito por estos dos genios en 1943 [64] (su única publicación conjunta, escrita durante la estadía de PAULI en Princeton) se refiera a aspectos técnicos de la teoría general de la relatividad. PAULI recibió en 1945 el premio Nobel por el descubrimiento que hizo en el año 1925 del llamado *principio de exclusión de Pauli*.

Con STERN, EINSTEIN también escribió sólo un artículo conjunto [66], cuando ambos estaban en Praga. STERN fue galardonado con el premio Nobel de 1943 por su descubrimiento del momento magnético del protón.

EINSTEIN también publicó con el ruso BORIS PODOLSKY y con el austriaco PAUL EHRENFEST [61], quien

³Cotas superiores de los números de ERDŐS de todos los ganadores de la Medalla Fields, hasta 1994, ya habían sido presentados por los autores en [48], [89] y [93], pero muchos números se han reducido para el presente artículo.

⁴La bibliografía completa de las publicaciones de ERDŐS's hasta 1996 ha sido preparada por el segundo autor [91], con actualizaciones anuales desplegadas en la página *Web*, *The Erdős Number Project* [89].

fuera uno de sus más cercanos amigos. La conocida paradoja EINSTEIN-PODOLSKY-ROSEN, concebida como un experimento mental contra la concepción de la mecánica cuántica, se originó en su artículo conjunto [65] de 1935. Entre los co-autores de PODOLSKY aparecen por lo menos dos premios Nobel: el gran físico teórico británico PAUL DIRAC [57] y el químico norteamericano LINUS PAULING [142]; por lo tanto, ambos son ERDÖS-4, a lo sumo. PAULING recibió el Nobel de química en 1954 por sus investigaciones sobre los enlaces químicos; su tratado clásico *The Nature of the Chemical Bond* (1939) es considerado por los químicos, casi unánimemente, como la más importante publicación de la química teórica del siglo XX. PAULING fue un entusiasta partidario del control de las armas nucleares; por sus innumerables campañas internacionales recibió en 1962 el premio Nobel de la paz, lo que lo convierte en la única persona, hasta la fecha, que ha recibido dos premios Nobel individuales (no compartidos) en dos categorías diferentes.

Un hecho poco conocido es que EINSTEIN escribió un artículo con un médico: el judío alemán HANS MÜHSAM, amigo personal en sus años de Berlín. En 1923 publicaron en una revista médica un reporte sobre la determinación experimental de la permeabilidad de filtros [63].

Podemos citar además dos curiosas publicaciones conjuntas no-técnicas de EINSTEIN. La primera de ellas es un reporte sobre una oficina internacional de meteorología, escrito en 1927 con MARIE CURIE y HENDRIK A. LORENTZ y publicado en la revista *Science* [44]. La segunda es el folleto titulado *¿Por qué la guerra?* [62], escrito en 1933 con SIGMUND FREUD (a petición de éste; véase [140]). Apareció en alemán, francés e inglés y fue patrocinado por el Instituto Internacional de Cooperación Intelectual de la Liga de las Naciones.

• HENDRIK A. KRAMERS, físico holandés, fue uno de los colaboradores de PAULI [114] y también publicó con el premio Nobel danés NIELS BOHR [25], uno de los pilares del pensamiento científico del siglo XX. Por consiguiente, BOHR es, a lo sumo, ERDÖS-5. En 1923 BOHR publicó el trabajo [24] con el físico holandés DIRK COSTER quien, a su vez, fue co-autor en el mismo año de GEORGE C. DE HEVESY [42]⁵, químico húngaro que recibiría el premio Nobel de química en 1943 por su uso de radioisótopos como rastreadores (o indicadores), importante técnica que sirvió para mejorar el entendimiento de los procesos químicos en los seres vivos.

JOHN A. WHEELER fue un distinguido colaborador de BOHR. En 1939 escribieron el estudio seminal *The mechanism of nuclear fission* [26], con el que WHEELER se erigió en el primer norteamericano en contribuir al desarrollo teórico de las armas nucleares; en dicha memoria se señala que el uranio-235 podría usarse en una posible bomba atómica.

Otro de los co-autores de KRAMERS es el holandés LEONARD S. ORNSTEIN [138], a su vez conectado con su compatriota FRITS ZERNIKE [139], laureado con el premio Nobel de física de 1953 (por su invención del microscopio de contraste de fase). En consecuencia, ZERNIKE es ERDÖS-6, como máximo.

• J. ROBERT OPPENHEIMER se encuentra entre los co-autores de EHRENFEST [59], lo que lo convierte en un ERDÖS-4. OPPENHEIMER es principalmente recordado por haber sido director del laboratorio de Los Alamos durante la construcción de la primera bomba atómica (1943-45), y director del *Institute for Advanced Study* de Princeton (1947-66). ROBERT SERBER, quien fue alumno y cercano colaborador suyo [136], está ligado con por lo menos dos premios Nobel, los físicos nucleares estadounidenses ERNEST O. LAWRENCE y EDWIN M. MCMILLAN [33]. SERBER, LAWRENCE, and MCMILLAN fueron miembros destacados del equipo científico en Los Alamos. LAWRENCE recibió el premio Nobel de física en 1939 por su invención del ciclotrón; en su honor fue bautizado el elemento químico 103, lawrencio. MCMILLAN compartió el premio Nobel de química de 1953 por su descubrimiento del elemento 93, neptunio, el primer elemento más pesado que el uranio. Las conexiones anteriores muestran que tanto LAWRENCE como MCMILLAN tienen número de ERDÖS 6, a lo sumo.

El astrofísico HARTLAND SNYDER fue co-autor de OPPENHEIMER; en su artículo conjunto [137] de 1939 se encuentra el primer tratamiento relativista de la noción de agujero negro.

• MAX BORN, premio Nobel de física en 1954, es ERDÖS-3 por su colaboración con NORBERT WIENER, el creador de la cibernética, cuyo número de ERDÖS es 2. Su único artículo conjunto [30] fue escrito durante la visita de BORN al MIT en 1925. Entre los co-autores de BORN encontramos a sus compatriotas alemanes WERNER HEISENBERG y PASCUAL JORDAN [27] —los tres son los fundadores de la mecánica cuántica moderna— y a MAX VON LAUE [29]⁶. Por su prominente papel en la formulación de los fundamentos de la mecánica cuántica,

⁵En ese artículo se reportó el descubrimiento de un nuevo elemento químico, el hafnio.

⁶Esta última "colaboración científica" es, en realidad, el obituario (técnico) del físico MAX ABRAHAM (1875-1922).

Premios Nobel de física	Año	Número de Erdős	Premios Nobel de física	Año	Número de Erdős
MAX VON LAUE	1914	4	EMILIO SEGRÈ	1959	4
ALBERT EINSTEIN	1921	2	OWEN CHAMBERLAIN	1959	5
NIELS BOHR	1922	5	ROBERT HOFSTADTER	1961	5
LOUIS DE BROGLIE	1929	5	EUGENE WIGNER	1963	4
WERNER HEISENBERG	1932	4	RICHARD P. FEYNMAN	1965	4
PAUL A. DIRAC	1933	4	JULIAN S. SCHWINGER	1965	4
ERWIN SCHRÖDINGER	1933	8	HANS A. BETHE	1967	4
ENRICO FERMI	1938	3	LUIS W. ALVAREZ	1968	4
ERNEST O. LAWRENCE	1939	6	MURRAY GELL-MANN	1969	3
OTTO STERN	1943	3	JOHN BARDEEN	1972	5
ISIDOR I. RABI	1944	4	LEON N. COOPER	1972	6
WOLFGANG PAULI	1945	3	JOHN R. SCHRIEFFER	1972	5
FRITS ZERNIKE	1953	6	AAGE BOHR	1975	5
MAX BORN	1954	3	BEN MOTTELSON	1975	5
WILLIS E. LAMB	1955	3	LEO J. RAINWATER	1975	7
JOHN BARDEEN	1956	5	STEVEN WEINBERG	1979	4
WALTER H. BRATTAIN	1956	6	SHELDON LEE GLASHOW	1979	2
WILLIAM B. SHOCKLEY	1956	6	ABDUS SALAM	1979	3
CHEN NING YANG	1957	4	S. CHANDRASEKHAR	1983	4
TSUNG-DAO LEE	1957	5	NORMAN F. RAMSEY	1989	3

Premios Nobel de economía	Año	Número de Erdős	Premios Nobel de química	Año	Número de Erdős
PAUL A. SAMUELSON	1970	5	PETER J. DEBYE	1936	5
KENNETH J. ARROW	1972	3	GEORGE DE HEVESY	1943	7
TJALLING C. KOOPMANS	1975	4	OTTO DIELS	1950	7
GERARD DEBREU	1983	3	KURT ALDER	1950	6
FRANCO MODIGLIANI	1985	5	EDWIN M. McMILLAN	1951	6
ROBERT M. SOLOW	1987	4	GLENN T. SEABORG	1951	5
HARRY M. MARKOWITZ	1990	2	LINUS PAULING*	1954	4
MERTON H. MILLER	1990	4	LARS ONSAGER	1968	3
JOHN C. HARSANYI	1994	8	ILYA PRIGOGINE	1977	6
JOHN F. NASH	1994	4	WALTER GILBERT	1980	4
REINHARD SELTEN	1994	7	KENICHI FUKUI	1981	3
ROBERT C. MERTON	1997	6	JEROME KARLE	1985	4
			HERBERT A. HAUPTMAN	1985	3

*También recibió el premio Nobel de la paz en 1962

Premios Nobel de Medicina-Fisiología	Año	Número de Erdős
FRANCIS H. C. CRICK	1962	7
JAMES D. WATSON	1962	8

TABLA 1. Cotas superiores de los números de Erdős de algunos premios Nobel.

HEISENBERG fue el único laureado con el premio Nobel de física de 1932. A VON LAUE se le había otorgado el premio Nobel de 1914 por sus investigaciones sobre difracción de rayos X en cristales, que es el origen de la física del estado sólido. Sus investigaciones también sirvieron para demostrar que los rayos X son radiaciones electromagnéticas similares a la luz.

Además, HEISENBERG publicó con el director de su tesis doctoral, el alemán ARNOLD SOMMERFELD [102] (también tutor de PAULI en Munich), quien es recordado por sus modificaciones existosas del modelo atómico de BOHR. Uno de los muchos co-autores de SOMMERFELD fue PETER J. DEBYE (a veces escrito DEBIJE) [52], científico holandés, premio Nobel de química en 1936. Sin embargo, el número de ERDŐS de DEBYE es menor que el que se obtendría mediante dicha colaboración ya que escribió un artículo conjunto con PAULING [53].

No podríamos olvidar otro famoso co-autor de BORN, THEODORE VON KÁRMÁN [28], el ingeniero húngaro-estadounidense que fue uno de los fundadores de la ingeniería aeronáutica.

• JOHN VON NEUMANN y ERDŐS nunca escribieron un trabajo conjunto aunque ambos eran húngaros de nacimiento y su diferencia de edades era de apenas 10 años. En realidad, VON NEUMANN nunca escribió con ninguno de los más de 500 co-autores de ERDŐS; su número de ERDŐS es 3 por sus abundantes colaboraciones con individuos de la lista ERDŐS-2, tales como SALOMON BOCHNER, PAUL HALMOS y HERMAN H. GOLDSTINE.

Por lo demás, VON NEUMANN tuvo co-autores ilustres entre los que se destacan DAVID HILBERT, OSWALD VEBLEN, GEORGE D. BIRKHOFF, PASCUAL JORDAN y los premios Nobel de física EUGENE WIGNER y SUBRAHMANYAM CHANDRASEKHAR, (véase [161]). Con HILBERT, VON NEUMANN escribió sobre los fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica [103] poco después de que HEISENBERG propusiera su concepción cuántica, conocida como mecánica matricial. HILBERT, VON NEUMANN y HEISENBERG estaban en Gotinga en esa época. WIGNER era también húngaro y amigo de VON NEUMANN desde la infancia; la mayoría de sus artículos conjuntos tratan igualmente problemas en mecánica cuántica. Pasando por WIGNER encontramos una trayectoria hasta uno de los más grandes nombres de la física cuántica, el austriaco ERWIN SCHRÖDINGER, quien compartió el premio Nobel de 1933 con DIRAC por

su introducción de las ecuaciones de onda. Esta es la ruta: WIGNER con R. F. O'CONNELL [104] con JOHN TREVOR LEWIS [75] con JAMES MCCONNELL [120] con SCHRÖDINGER [128]. De esta manera, SCHRÖDINGER resulta ser un ERDŐS-8, como máximo.

Otro conocido colaborador de VON NEUMANN fue el economista austriaco OSKAR MORGENSTERN, con quien escribió en 1944 el influyente volumen *Theory of Games and Economic Behaviour* [162]. Este libro, del que se tiraron varias ediciones, estimuló a nivel mundial el desarrollo de las matemáticas de la teoría de juegos y sus aplicaciones en áreas tan disímiles como economía, política, ciencias militares, investigación de operaciones, negocios, derecho, deporte y biología (véase [159]). La teoría de juegos ha llegado a ser muy relevante en economía; basta mencionar que por lo menos tres premios Nobel de economía han sido otorgados a especialistas de la teoría de juegos. Todos ellos están en la componente de ERDŐS de C (como lo mostraremos más adelante), aun cuando ninguno está directamente relacionado ni con VON NEUMANN ni con MORGENSTERN.

De otro lado, MORGENSTERN escribió conjuntamente con JOHN G. KEMENY [112], el creador (junto con THOMAS E. KURTZ) en la década de los sesenta del muy popular lenguaje de programación BASIC.

En la década de los cincuenta se realizaron en el *Institute for Advanced Study* de Princeton los primeros intentos a nivel mundial para utilizar computadores digitales al problema de la predicción del tiempo. Allí, VON NEUMANN trabajó en estrecha colaboración con el líder del equipo, el meteorólogo norteamericano JULE G. CHARNEY. De esta cooperación surgió el artículo conjunto [39].

• GEORGE UHLENBECK, el destacado físico holandés nacionalizado estadounidense, tiene número de ERDŐS 2. Se le conoce principalmente por haber postulado, junto con SAMUEL GOUDSMIT, el concepto de *spin* del electrón, que condujo a cambios sustanciales en la teoría atómica y en la mecánica cuántica. Su muy famoso artículo conjunto [160] fue publicado en 1925, cuando eran aún estudiantes de posgrado en la universidad holandesa de Leiden (ambos fueron discípulos de EHRENFEST).

Entre los co-autores de UHLENBECK encontramos por lo menos dos premios Nobel de física: el norteamericano WILLIS E. LAMB (Nobel 1955) [135], cuyos experimentos sugirieron drásticos refinamientos en las teorías cuánticas del electromagnetismo, y el italiano ENRICO

FERMI (Nobel 1938) [70], uno de los principales arquitectos de la era nuclear. FERMI tuvo toda una pléyade de co-autores y colaboradores en Europa y en los Estados Unidos; uno de ellos fue su exalumno en Roma, EMILIO SEGRÈ [68], quien también llegaría a recibir el premio Nobel. SEGRÈ y su colega de la Universidad de California en Berkeley, el norteamericano OWEN CHAMBERLAIN, descubrieron el antiprotón en 1955, hazaña por la cual se les concedió el premio Nobel de física de 1959 (también publicaron conjuntamente [36]). Los nexos anteriores muestran que los números de ERDŐS (máximos) de FERMI, SEGRÈ y CHAMBERLAIN son 3, 4 y 5, respectivamente⁷. Otro co-autor de SEGRÈ fue el químico nuclear estadounidense GLENN T. SEABORG [154], quien recibió la mitad del premio Nobel de 1951 por sus investigaciones en elementos transuránidos (la otra mitad del premio la recibió MCMILLAN, a quien mencionamos en relación con OPPENHEIMER).

EDWARD TELLER, el físico nuclear húngaro-estadounidense que dirigió el equipo que construyó la primera bomba termonuclear, es otro co-autor de FERMI [69]. Uno de los estudiantes de doctorado que TELLER tuvo en Chicago fue el físico chino CHEN NING YANG (posteriormente asistente de FERMI), con quien publicó trabajos de investigación [71]. YANG y su compatriota TSUNG-DAO LEE recibieron el premio Nobel de física en 1957 por su descubrimiento [117], [118] de las violaciones del principio de conservación de la paridad en las interacciones débiles, hallazgo trascendental en la física de partículas. De las colaboraciones que acabamos de citar, concluimos que YANG es ERDŐS-4 y LEE es ERDŐS-5, a lo sumo.

• FREEMAN J. DYSON, el físico británico-norteamericano conocido por el público profano por sus escritos sobre civilizaciones extraterrestres y por su defensa de la exploración espacial, es un miembro notable de la lista ERDŐS 2. Está conectado, por intermedio de RICHARD H. DALITZ [45], con el físico alemán-estadounidense HANS A. BETHE [47], una de las figuras centrales de la física cuántica y atómica del siglo XX. BETHE fue director de la División de Física Teórica del Proyecto Manhattan y fue honrado con el premio Nobel en 1967 por su explicación de la producción de energía en las estrellas. El conocido astrofísico austriaco EDWIN E. SALPETER está incluido en el extenso grupo de co-autores y colaboradores de BETHE [150].

BETHE es uno de los protagonistas de una publicación conjunta bastante peculiar [3], que llama la atención por la singular combinación de apellidos de sus autores: ALPHER, BETHE, GAMOW. El tercer autor es GEORGE GAMOW, físico nuclear y cosmólogo nacido en Ucrania que también hizo contribuciones a la teoría genética moderna; el primer autor es RALPH ALPHER, uno de sus estudiantes. El artículo mismo, *The origin of chemical elements*, tiene de hecho, considerable importancia histórica: en él los autores defendieron la idea de que los elementos químicos se sintetizaron en reacciones termonucleares durante la explosión primigenia, y predijeron la radiación cósmica de fondo. Se dice que BETHE no contribuyó realmente con la elaboración del trabajo y que fue GAMOW quien le solicitó la inclusión de su nombre para lograr la combinación 'alfa-beta-gama'. Fue también GAMOW quien acuñó la expresión "big-bang" (el "gran pum"); la versión moderna de esta teoría, modificada por él y sus colaboradores, es el postulado más aceptado de la cosmología.

Por intermedio de DALITZ podemos enlazar otro premio Nobel de física, el norteamericano ROBERT HOFSTADTER, quien compartió el premio de 1961 por sus investigaciones sobre protones y neutrones. La siguiente ruta hace de él un ERDŐS-5: DALITZ con D. G. RAVENHALL [46] con R. HOFSTADTER [97].

• SHELDON LEE GLASHOW, físico teórico norteamericano y premio Nobel en 1979, tiene número de ERDŐS 2 por su colaboración [82] con el especialista en combinatoria DANIEL KLEITMAN, quien es ERDŐS-1 (y también cuñado suyo). GLASHOW y EINSTEIN comparten la siguiente distinción: son los únicos premios Nobel de física (hasta la fecha) con número de ERDŐS ≤ 2 .

MURRAY GELL-MANN, premio Nobel de física en 1969, es compatriota y co-autor de GLASHOW [81]; es conocido por haber introducido el concepto y la palabra *quark* para referirse a una partícula subatómica básica. GELL-MANN también colaboró con el brillante físico norteamericano y premio Nobel, RICHARD FEYNMAN [73]. FEYNMAN participó en el proyecto Manhattan (tenía sólo 25 años de edad cuando fue reclutado) y publicó con BETHE [13]. Los dos concibieron la fórmula para predecir la energía liberada por un explosivo nuclear.

FEYNMAN, quien había sido alumno de WHEELER en Princeton y había publicado con él [163], llegó a ser una figura sobresaliente de la física de posguerra; recibió

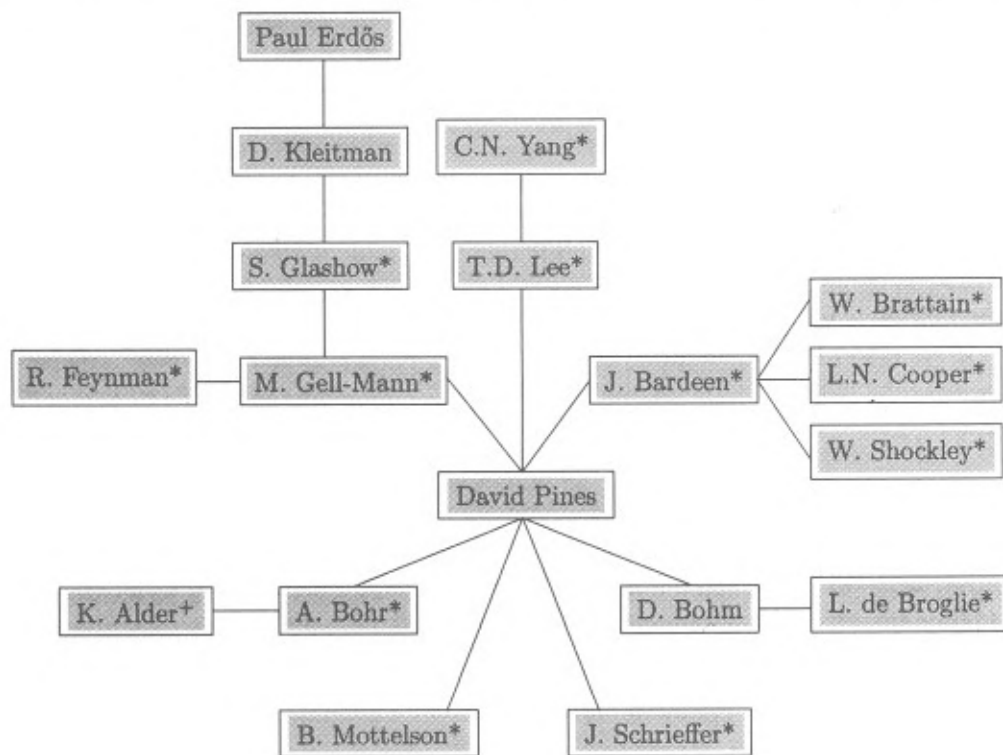
⁷Si aceptáramos los reportes técnicos como colaboraciones válidas para la determinación de números de ERDŐS, podríamos reducir el número de ERDŐS de FERMI a 2, por el reporte técnico que escribió en Los Alamos con STANISLAW ULAM, reputado co-autor de ERDŐS.

el premio Nobel en 1965 por su original teoría de la electrodinámica cuántica. Compartió el premio Nobel con JULIAN S. SCHWINGER, quien independientemente formuló una teoría de la electrodinámica cuántica, sin saber que FEYNMAN en los Estados Unidos y SIN-ITIRO TOMONAGA en el Japón estaban trabajando en el mismo problema. Sus teorías son esencialmente equivalentes y reconcilian la mecánica cuántica con la teoría especial de la relatividad. Podemos conectar a SCHWINGER con ERDŐS siguiendo este camino: SCHWINGER con NORMAN F. RAMSEY [144] con W. H. FURRY [78], siendo este último un ERDŐS-2. Por lo tanto, SCHWINGER es a lo más ERDŐS-4. Algo por demás curioso es que FEYNMAN y SCHWINGER nacieron en el mismo año, 1918, en la misma ciudad, New York, recibieron el premio Nobel el mismo año y por el mismo logro, y —de acuerdo con las rutas más cortas que hemos podido encontrar— tienen también el mismo número de ERDŐS, 4.

Los dos co-autores de SCHWINGER en el artículo citado arriba [144], los norteamericanos ISIDOR I. RABI y

NORMAN RAMSEY, son también premios Nobel. RABI recibió el premio de física en 1944 por su invención de 1937 del método de la resonancia magnética, técnica que ha hecho posible aplicaciones tales como el láser y la llamada medicina nuclear. RAMSEY fue galardonado con el premio Nobel de física de 1989 por su método de los campos oscilatorios en el que se basa el funcionamiento del reloj atómico de cesio, con el cual se determina actualmente el estándar del tiempo. Según estos nexos, RAMSEY es ERDŐS-3 y RABI ERDŐS-4.

• DAVID PINES, físico norteamericano que publica sobre astrofísica y sobre la teoría de la materia condensada, es una personalidad preponderante del grafo de colaboración. Como co-autor de GELL-MANN [67], es a lo más ERDŐS-4. PINES ha escrito artículos investigativos en co-autoría con seis premios Nobel y está a distancia 2 de ocho más. De suerte que, en el grafo de colaboración, PINES está a una distancia no mayor que 2 de 14 premios Nobel diferentes (véase la Figura 1). Ninguno de los científicos mencionados en el presente artículo



* Premio Nobel de física

+ Premio Nobel de química

FIGURA 1. Aglomeración de premios Nobel alrededor de David Pines.

(incluyendo al mismo ERDŐS) está tan cerca de tantos ganadores del premio Nobel.

Dos de los co-autores de PINES son JOHN BARDEEN [17] y JOHN ROBERT SCHRIEFFER [141], quienes recibieron el premio Nobel de física en 1972, junto con su compatriota estadounidense LEON N. COOPER, por su teoría [15], [16] (conocida como teoría BCS, por las iniciales de sus apellidos), la primera teoría microscópica de la superconductividad realmente exitosa. Cuando hizo su contribución a la teoría BCS, SCHRIEFFER era un estudiante de posgrado de 26 años en la Universidad de Illinois de la cual BARDEEN era profesor en los departamentos de física e ingeniería eléctrica.

Debe recordarse que BARDEEN había recibido otro premio Nobel de física, en 1956, en compañía de WALTER H. BRATTAIN y WILLIAM B. SHOCKLEY. Fueron laureados por sus investigaciones en semiconductores y por su invención del transistor⁸. Teniendo en cuenta sus artículos con BARDEEN ([14], [18]), BRATTAIN y SHOCKLEY resultan ser ERDŐS-6, como máximo.

Dos co-autores más de PINES son el danés AAGE BOHR (hijo de NIELS BOHR) y el danés-estadounidense BEN MOTTELSON [22] quienes compartieron el premio Nobel de física de 1975 por las investigaciones que realizaron a comienzos de los cincuenta en las que determinaron la forma asimétrica de ciertos núcleos atómicos. Sus experimentos se habían inspirado en las teorías del físico norteamericano LEO JAMES RAINWATER, quien también recibió el premio Nobel ese año. El número de Erdős de RAINWATER es finito, 7 a lo sumo, por vía de TSUNG-DAO LEE, quien, como vimos antes, es ERDŐS-5: LEE con C. S. WU [119] con RAINWATER [145]. A propósito, PINES también ha escrito con LEE [116] (véase la Figura 1).

Un co-autor de AAGE BOHR es KURT ALDER [1], químico alemán, discípulo y asistente de OTTO DIELS, con quien compartió el premio Nobel de química en 1950 por su método para preparar compuestos orgánicos cíclicos. Dicha técnica (conocida como la *reacción Diels-Alder*) resultó especialmente útil en la producción de plásticos sintéticos. El primero de muchos artículos que escribieron sobre el tópico apareció en 1928 [56]. Los números de ERDŐS máximos de ALDER y DIELS son, por tanto, 6 y 7, respectivamente.

Además del padre NIELS y el hijo AAGE, hay otro miembro de la familia BOHR en la componente de ERDŐS de C ; se trata del hermano menor de NIELS, HARALD, que fue un prominente matemático. Fue él quien concibió la teoría de las funciones casi-periódicas y su nombre se recuerda en el *teorema de Bohr-Landau* sobre la función zeta. El número de ERDŐS de HARALD es 3 por su artículo conjunto [23] con BORGE JESSEN, cuyo número de ERDŐS es 2. Como una curiosidad, podemos determinar qué tan lejos están los BOHR, unos de otros, en el grafo de colaboración C . Usando a PAUL ERDŐS como pivote, observamos que los hermanos NIELS y HARALD están a distancia 8, mientras que la distancia entre los dos premios Nobel, NIELS y su hijo AAGE, es de 10. Lo más probable es que estas distancias se puedan reducir detectando nodos y referencias bibliográficas adicionales.

- ABDUS SALAM y STEVEN WEINBERG compartieron con el ya citado GLASHOW el premio Nobel de física de 1979 por sus contribuciones, realizadas de manera independiente, a la teoría unificada de las interacciones electromagnética y nuclear débil. SALAM, quien fue el primer paquistaní en recibir un premio Nobel, en categoría alguna, es a lo más ERDŐS-3 por su publicación conjunta [149] con J. C. WARD quien es Erdős-2. Esta última publicación (de 1959) es históricamente significativa ya que fue uno de los primeros intentos (no satisfactorios) hacia una teoría unificada electro-débil.

WEINBERG resulta ser ERDŐS-4 en vista de sus muchas publicaciones con SALAM; por ejemplo, [86].

Entre los muchos co-autores de SALAM encontramos a otro ganador del premio Nobel, el biólogo molecular estadounidense WALTER GILBERT⁹ [148], quien compartió (con PAUL BERG y FREDERICK SANGER) el galardón de química de 1980 por sus análisis químicos y biológicos del DNA.

- EDWARD WITTEN, el destacado físico teórico norteamericano y Medalla Fields en 1990, es a lo sumo ERDŐS-3, como se mostrará más adelante. Entre sus co-autores encontramos al físico norteamericano LUIS W. ALVAREZ [5], premio Nobel en 1968 por sus investigaciones sobre partículas subatómicas. En 1980, un equipo integrado, entre otros, por ALVAREZ y su hijo geólogo, WALTER, propuso una controversial y ampliamente publicitada

⁸Por sus contribuciones fundamentales a la ciencia, JOHN BARDEEN fue escogido por la revista *Life* como uno de los 100 individuos más influyentes del siglo XX.

⁹GILBERT obtuvo realmente el título de Ph.D. en matemáticas (de la universidad de Cambridge).

Científicos Notables	Áreas de Investigación	# de Erdős
WALTER ALVAREZ	Geología	5
RUDOLF CARNAP	Filosofía	4
JULE G. CHARNEY	Meteorología	4
NOAM CHOMSKY	Lingüística	4
FREEMAN J. DYSON	Física cuántica	2
GEORGE GAMOW	Física Nuclear	5
STEPHEN HAWKING	Relatividad, cosmología	5
PASCUAL JORDAN	Física cuántica	4
THEODORE VON KÁRMÁN	Ingeniería Aeronáutica	4
JOHN MAYNARD SMITH	Biología	4
OSKAR MORGENSTERN	Economía	4
J. ROBERT OPPENHEIMER	Física Nuclear	4
ROGER PENROSE	Relatividad, cosmología	6
JEAN PIAGET	Psicología	3
KARL POPPER	Filosofía	5
EDWIN E. SALPETER	Astrofísica	5
CLAUDE E. SHANNON	Ingeniería Eléctrica	3
ARNOLD SOMMERFELD	Física Atómica	5
EDWARD TELLER	Física Nuclear	4
GEORGE UHLENBECK	Física Atómica	2
JOHN A. WHEELER	Física Nuclear	5

TABLA 2. Cotas superiores de los números de Erdős de algunos distinguidos investigadores.

teoría para explicar —por medio de consideraciones geológicas— que los dinosaurios se extinguieron como consecuencia del impacto de un asteroide sobre la Tierra. Se publicó en la revista británica *Science* [4].

Otro co-autor de WITTEN es GARY HOROWITZ [35], quien, a su vez, ha colaborado con STEPHEN HAWKING [80], el físico teórico inglés que es casi un ícono de la ciencia actual y cuyo libro de 1988 *A Brief History of Time* fue un *best-seller* internacional. HAWKING ha publicado también con su compatriota, el matemático y físico SIR ROGER PENROSE [101], conocido por sus investigaciones prolifas sobre agujeros negros.

• LARS ONSAGER, químico noruego, discípulo de DEBYE y premio Nobel en 1968, tiene número de ERDŐS 3, como máximo, por ser co-autor de B. KAUFMAN [111], quien está en la lista ERDŐS-2. El premio Nobel se le concedió por su teoría termodinámica general de los procesos químicos irreversibles. A tres pasos de distancia de ONSAGER ([58], [132], [143]) encontramos a otro Nobel de química, el ruso-belga ILYA PRIGOGINE, quien precisamente se hizo acreedor del premio Nobel (en 1977) por extender considerablemente los estudios termodinámicos de ONSAGER; éstos han encontrado aplicaciones incluso en economía y sociología. Siguiendo dicho trayecto, PRIGOGINE es entonces ERDŐS-6.

• KENICHI FUKUI, químico japonés, recibió el premio Nobel de química de 1981 (junto con ROALD HOFFMANN) por sus investigaciones, iniciadas en la década de los cincuenta, sobre los mecanismos de las reacciones químicas. El número de ERDŐS de FUKUI no excede 3, por su artículo [8] con PAUL G. MEZEY, quien es ERDŐS-2. Puesto que FUKUI es un científico prolífico, esta conexión seguramente conduce a otros químicos notables.

• JEAN PIERRE VIGIER, distinguido físico francés, puede ser conectado con algunos nombres importantes; su número de ERDŐS no es mayor que 4 como se deduce de las siguientes publicaciones: VIGIER con CONSTANTIN PIRON [74] con STANLEY P. GUDDER [96] (el último citado es un ERDŐS-2).

Entre los co-autores de VIGIER sobresale su compatriota, el Príncipe LOUIS DE BROGLIE [34], quien en los años veinte desarrolló, en su tesis doctoral, una revolucionaria teoría de ondas de electrones (¡para la aprobación de la tesis se pidió la opinión de EINSTEIN!). Cuando la confirmación experimental se obtuvo años más tarde, se le concedió el premio Nobel (1929). Otro co-autor del trabajo que acabamos de citar [34] es el físico y filósofo norteamericano DAVID BOHM, el último discípulo de OPPENHEIMER en Berkeley y el originador de la interpretación causal en la teoría cuántica. Su libro de 1951 *Quantum Theory* es considerado un clásico. A BOHM se le conoce también por las investigaciones realizadas en los cincuenta con DAVID PINES (véase la Figura 1); sus artículos conjuntos [21], publicados bajo el título *A collective description of electron interactions*, señalaron el comienzo de todas las investigaciones actuales en la física del plasma.

SIR KARL R. POPPER, el eminente filósofo austriaco-británico, es un co-autor más de VIGIER [122]. La contribución filosófica más reconocida de POPPER es su rechazo del método inductivo en las ciencias empíricas. Irónicamente, su concepción apareció en 1934 en el libro *The Logic of Scientific Discovery*, publicado por el *Círculo de Viena*, grupo de filósofos positivistas que preconizaban vehementemente el empirismo inductivo.

• CLAUDE E. SHANNON, ingeniero eléctrico norteamericano, se hizo famoso por su modelo matemático elegante y general de la "comunicación", hoy conocido como *Teoría de la Información*. Sus ideas iniciales aparecieron en 1948 en el artículo *A mathematical theory of communication* [155], al que le siguió en 1949 un libro del mismo título, con la co-autoría de WARREN WEAVER [157]. El enfoque SHANNON-WEAVER

se desarrolló rápidamente llegando a formar parte vital de la cibernética, con aplicaciones en ingeniería eléctrica, óptica, termodinámica, análisis químico, biología, economía, bibliotecología e incluso sicología y lingüística.

El número de ERDŐS de SHANNON no pasa de 3 en razón de su colaboración [156] con ELWYN R. BERLEKAMP, que es un ERDŐS-2.

• FRANCIS H. C. CRICK, biofísico británico, y JAMES D. WATSON, genetista y biofísico estadounidense, hicieron un descubrimiento histórico al determinar la estructura molecular del ácido desoxirribonucleico (ADN) —como un polímero de doble hélice— gesta por la cual se les confirió el premio Nobel de Medicina/Fisiología en 1962. Su hallazgo fue publicado en dos célebres artículos en la revista británica *Nature*, en abril-mayo de 1953.

En 1957 CRICK publicó una corta nota conjunta [43] sobre la teoría de la información y de esa manera ingresó a la componente de ERDŐS de *C*. En efecto, a partir de dicha colaboración podemos mostrar que el número de ERDŐS de CRICK no es mayor que 7: CRICK con J. S. GRIFFITH [43] con I. W. ROXBURGH [146] con P. G. SAFFMAN [147] con H. B. KELLER [41] con K. O. FRIEDRICHS [76]. El último citado es ERDŐS-2.

JAMES WATSON sería entonces ERDŐS-8; de esta conexión podemos inferir que muchos otros investigadores activos en genética, biofísica, bioquímica y campos relacionados tienen también números de ERDŐS finitos.

• HERBERT A. HAUPTMAN, matemático, y JEROME KARLE, químico y cristalógrafo (ambos norteamericanos), compartieron el premio Nobel de química en 1985 por sus métodos matemáticos para deducir rápidamente la estructura de moléculas biológicas a partir de los patrones formados cuando rayos X son difractados por sus cristales.

El número de ERDŐS de HAUPTMAN es a lo sumo 3 por su publicación conjunta [95] con FRED GROSS, quien está en la lista ERDŐS-2. Esto hace de KARLE un investigador ERDŐS-4 ya que tiene varios artículos conjuntos con HAUPTMAN (p. ej. [99]).

• JOHN MAYNARD SMITH, biólogo británico, inició toda una nueva área de investigación con sus inusuales aplicaciones de la teoría de juegos al comportamiento animal y a la teoría de la evolución, con memorias como *Evolution and the Theory of Games* [125] y *The theory*

of games and the evolution of animal conflict [126]. Resulta que MAYNARD SMITH tiene un número de ERDŐS pequeño, no mayor que 4, si tenemos en cuenta su publicación [127] con JOSEF HOFBAUER y la de éste [105] con HAL L. SMITH, quien es ERDŐS-2.

• HARRY M. MARKOWITZ, experto en finanzas norteamericano, es premio Nobel de economía y está en la lista ERDŐS-2, erigiéndose en la única persona, hasta la fecha, que posee esta doble distinción. MARKOWITZ compartió el Nobel de 1990 con MERTON H. MILLER y WILLIAM F. SHARPE por sus estudios sobre los mercados financieros y las estrategias de inversión.

MILLER es como máximo ERDŐS-4, a través de ABRAHAM CHARNES [37] y FRED GLOVER [38], quien es ERDŐS-2. MILLER está también conectado [130], [131] con otro premio Nobel, el economista italiano FRANCO MODIGLIANI, enaltecido en 1985 por su análisis matemático de los ahorros familiares y la dinámica de los mercados financieros.

• HERBERT SCARF, economista estadounidense con número de ERDŐS 2, ha publicado artículos de análisis económico con muchos renombrados economistas, tales como KENNETH J. ARROW [9] y GERARD DEBREU [51], ganadores ambos del premio Nobel de economía (en 1972 y 1983, respectivamente). ARROW (norteamericano) recibió el galardón por sus teorías del equilibrio económico, mientras que DEBREU (francés) fue honrado por su tratamiento matemático de la teoría de la oferta y la demanda. En su ya clásica monografía de 1959 [49], DEBREU formalizó matemáticamente la teoría del valor y dió, por primera vez, un significado preciso a la célebre “mano invisible que rige los mercados” con la que ADAM SMITH había especulado casi doscientos años antes. Un co-autor de DEBREU es el economista holandés TJALLING C. KOOPMANS [50], también premio Nobel (1975).

Además, SCARF ha publicado con LLOYD S. SHAPLEY [158], especialista en teoría de juegos y co-autor del matemático estadounidense JOHN F. NASH [134], uno de los ganadores del premio Nobel de economía de 1994. Ese año también recibieron el premio el economista húngaro JOHN C. HARSANYI y el matemático alemán REINHARD SELTEN, por sus aplicaciones de la teoría de juegos a la economía (más precisamente, por “su análisis pionero del equilibrio en la teoría de juegos no-cooperativos”). Como es de esperarse, HARSANYI y SELTEN también tienen números de ERDŐS finitos,

tal como lo muestran las siguientes trayectorias: KOOPMANS con BECKMAN [113] con MARSCHAK [19] con SELTEN [123] con HARSANYI [98]. Con estos enlaces, SELTEN es ERDŐS-7 y HARSANYI, ERDŐS-8.

Desde ARROW encontramos un camino que nos conduce a dos premios Nobel de economía adicionales, los estadounidenses PAUL A. SAMUELSON y ROBERT M. SOLOW: [10], [151]. Tanto SAMUELSON como SOLOW utilizaron técnicas matemáticas innovadoras en economía; SAMUELSON (premio Nobel en 1970) en la teoría general del equilibrio y SOLOW (premio Nobel en 1987) en modelos de crecimiento económico.

Nos referimos ahora a una conexión Nobel más reciente: por su colaboración con SAMUELSON [129], el economista norteamericano ROBERT C. MERTON, uno de los laureados con el premio Nobel de economía en 1997, es a lo sumo ERDŐS-6. MERTON extendió el trabajo de MYRON S. SCHOLES y FISHER BLACK, quienes habían presentado en 1973 una fórmula novedosa y práctica para la valoración de opciones financieras. SCHOLES compartió el Nobel con MERTON, no así BLACK, debido a su prematura muerte en 1995¹⁰.

Algo digno de resaltar, al considerar las anteriores conexiones, es que HERBERT SCARF está, en el grafo de colaboración, a una distancia menor o igual que 6 de nueve premios Nobel de economía.

- NOAM CHOMSKY, lingüista y activista político estadounidense, es una de las personalidades más influyentes de la lingüística del siglo XX. En el periodo 1956-59 introdujo y elaboró la noción de gramática generativa, que cobija tanto los lenguajes naturales como los artificiales, y que ha sido de fundamental importancia en la teoría de la computación.

Las siguientes publicaciones revelan que CHOMSKY es ERDŐS-4, como máximo: CHOMSKY con M. P. SCHUTZENBERGER [40] con S. EILENBERG [60]; este último (el "prodigio polaco") es ERDŐS-2.

- JEAN PIAGET, el sicólogo suizo que realizó trascendentales descubrimientos sobre la adquisición del entendimiento en niños, también publicó extensamente sobre zoología, filosofía y epistemología. De hecho, posee algún tipo de record, si consideramos que antes de cumplir quince años había publicado varios artículos, sobre golondrinas y moluscos, ¡incluyendo uno que firmó cuando tenía 10 años de edad! (véase [32]). Entre sus abundantes publicaciones encontramos el tratado

Mathematical Epistemology and Psychology [20], escrito en cointoría con el lógico holandés EVERT W. BETH. Puesto que el número de ERDŐS de BETH es 2, el de PIAGET es a lo sumo 3.

- RUDOLF CARNAP, filósofo alemán y cabeza visible del Círculo de Viena, es a lo sumo ERDŐS-4, como lo demuestra esta ruta: CARNAP con YEHOSHUA BARRIL HILLEL [11] con M. PERLES [12]; el último citado aparece en la lista ERDŐS-2.

El lógico y filósofo norteamericano WILLARD V. QUINE, alumno de CARNAP en Praga, es conocido por haber emprendido un análisis constructivista sistemático de la filosofía. Su número de ERDŐS no excede 3, a raíz de su colaboración [115] con J. C. C. MCKINSEY, quien es ERDŐS-2 (MCKINSEY mismo fue un renombrado filósofo). Otro co-autor de QUINE, de relativa notoriedad, es el filósofo estadounidense NELSON GOODMAN [87], cuyas indagaciones sobre la filosofía y la ontología del arte han tenido considerable influencia.

- BILL GATES (WILLIAM H. GATES), fundador y presidente de *Microsoft*, y el hombre más rico del mundo en la actualidad, ha adquirido un número de ERDŐS finito, ¡sin usar su dinero! Esto se debe al artículo [79] que escribió en 1979 con el griego CHRISTOS H. PAPANIMITRIOU, en ese entonces profesor de computación del MIT. Cuando el artículo apareció, GATES tenía 24 años y *Microsoft* era una pequeña y desconocida compañía fundada 3 años antes.

Puesto que PAPANIMITRIOU publicó en 1991 con XIAO TIE DENG [54], quien es ERDŐS-2, BILL GATES es ERDŐS-4 a lo sumo.

3. Números de Erdős de los ganadores de la Medalla Fields

La *Medalla Fields* fue establecida por el matemático canadiense JOHN CHARLES FIELDS (1863-1932) para enaltecer tanto logros notables como potencial investigativo en las diferentes áreas de la matemática. Se ha concedido siempre a matemáticos no mayores de 40 años, aunque el límite de edad no fue ni sugerido ni exigido por FIELDS mismo (véase [108]). Se conceden un mínimo de dos y un máximo de cuatro medallas cada cuatro años, durante el Congreso Internacional de Matemáticos. La primera premiación se hizo en el Congreso de Oslo de

¹⁰ Los lectores interesados en los aspectos matemáticos del premio Nobel de economía de 1997 pueden consultar los muy interesantes reportes [55] y [72].

Medalla Fields	Año	País de origen	# de Erdős
LARS AHLFORS	1936	Finlandia	4
JESSE DOUGLAS	1936	EE.UU	4
LAURENT SCHWARTZ	1950	Francia	4
ATLE SELBERG	1950	Noruega	2
KUNIHICO KODAIRA	1954	Japón	2
JEAN-PIERRE SERRE	1954	Francia	3
KLAUS ROTH	1958	Alemania	2
RENE THOM	1958	Francia	4
LARS HORMANDER	1962	Suecia	3
JOHN MILNOR	1962	EE.UU	3
MICHAEL ATIYAH	1966	Gran Bretaña	4
PAUL COHEN	1966	EE.UU	5
ALEXANDER GROTHENDIECK	1966	Alemania	5
STEPHEN SMALE	1966	EE.UU	4
ALAN BAKER	1970	Gran Bretaña	2
HEISUKE HIRONAKA	1970	Japón	4
SERGE NOVIKOV	1970	Rusia	3
JOHN G. THOMPSON	1970	EE.UU	3
ENRICO BOMBIERI	1974	Italia	2
DAVID MUMFORD	1974	Gran Bretaña	2
PIERRE DELIGNE	1978	Bélgica	3
CHARLES FEFFERMAN	1978	EE.UU	2
GREGORI MARGULIS	1978	Rusia	4
DANIEL QUILLEN	1978	EE.UU	3
ALAIN CONNES	1982	Francia	3
WILLIAM THURSTON	1982	EE.UU	4
SHING-TUNG YAU	1982	China	2
SIMON DONALDSON	1986	Gran Bretaña	4
GERD FALTINGS	1986	Alemania	4
MICHAEL FREEDMAN	1986	EE.UU	4
VALDIMIR DRINFELD	1990	Rusia	4
VAUGHAN JONES	1990	Nueva Zelanda	4
SHIGEMUFI MORI	1990	Japón	3
EDWARD WITTEN	1990	EE.UU	3
PIERRE-LOUIS LIONS	1994	Francia	4
JEAN CHRISTOPHE YOCOZ	1994	Francia	4
JEAN BOURGAIN	1994	Bélgica	2
EFIM ZELMANOV	1994	Rusia	4
RICHARD BORCHERDS	1998	Suráfrica	2
WILLIAM T. GOWERS	1998	Gran Bretaña	4
MAXIM L. KONTSEVICH	1998	Rusia	4
CURTIS McMULLEN	1998	EE.UU.	3.

TABLA 3. Cotas superiores de los números de Erdős de los ganadores de la Medalla Fields.

1936 y recayó en el matemático finlandés LARS AHLFORS y en el neoyorquino JESSE DOUGLAS (ambos ya fallecidos); por el conflicto europeo se suspendió durante 14 años y se reanudó en 1950. En total, se han conferido 42 medallas a matemáticos de 14 países diferentes. La última ceremonia tuvo lugar en Berlín, en agosto de 1998.

Una lectura cuidadosa de la Tabla 3 muestra que, aunque ERDŐS nunca publicó con ninguno de los 42

Premio Steele	Año	País de origen	# de Erdős
SALOMON BOCHNER	1979	Polonia	2
ANTONI ZYGMUND	1979	Polonia	2
ANDRÉ WEIL	1980	Francia	4
GERHARD P. HOCHSCHILD	1980	Alemania	4
OSCAR ZARISKI	1981	Polonia	3
FRITZ JOHN	1982	Alemania	4
SHIING SHEN CHERN	1983	China	2
JOSEPH L. DOOB	1984	EE.UU	2
HASSLER WHITNEY	1985	EE.UU	2
SAUNDERS MAC LANE	1986	EE.UU	3
SAMUEL EILENBERG	1987	Polonia	2
DEANE MONTGOMERY	1988	EE.UU.	3
IRVING KAPLANSKY	1989	Canadá	1
RAOUL BOTT	1990	Hungría	3
ARMAND BOREL	1991	Suiza	3
PETER D. LAX	1992	Hungría-EE.UU	3
EUGENE B. DYNKIN	1993	Rusia	3
LOUIS NIRENBERG	1994	Canadá	3
JOHN T. TATE	1995	EE.UU.	3
GORO SHIMURA	1996	Japón	2
RALPH S. PHILLIPS	1997	EE.UU.	2
NATHAN JACOBSON	1998	EE.UU.	3
RICHARD V. KADISON	1999	EE.UU.	3

TABLA 4. Cotas superiores de los números de Erdős de los ganadores del Premio Steele (Vida y Obra).

medallistas (algo que ameritaría una reflexión adicional), 10 de ellos tienen número de ERDŐS 2 y sólo para dos (COHEN y GROTHENDIECK) el número es mayor que 4. Los grafos de colaboración de los cuales hemos obtenido estos valores se encuentran desplegados en el sitio *Web* [89]. Es posible que algunos caminos se puedan acortar aún más, pero con los datos actuales el número de ERDŐS promedio de los medallistas Fields es 3.31, con desviación estándar 0.89 y mediana 4.

4. Números de Erdős de los ganadores de los premios Steele, Wolf y Nevanlinna

La Medalla Fields tiene el prestigio de un premio Nobel, pero hay muchos otros galardones internacionales importantes conferidos a matemáticos. Tal vez los que tienen mayor reputación, y que han adquirido prominencia con los años, son el premio Leroy P. Steele, el premio Rolf Nevanlinna y el premio Wolf en Matemáticas. Estas distinciones se instituyeron en el lapso de 12 años, a partir de 1970.

• El *Premio Leroy P. Steele* es concedido por la *American Mathematical Society*. Entre 1970 y 1976 se otorgaron uno o más premios por publicaciones investigativas sobresalientes; en 1977 la AMS modificó los términos bajo los cuales se entregaban los premios (véase [6]).

Premio Wolf	Año	País	# de Erdős
IZRAIL M. GELFAND	1978	Rusia	3
CARL L. SIEGEL	1978	Alemania	3
JEAN LERAY	1979	Francia	3
ANDRÉ WEIL (PS)	1979	Francia	4
HENRI CARTAN	1980	Francia	3
ANDREI N. KOLMOGOROV	1980	Rusia	5
LARS AHLFORS (MF)	1981	Finlandia	4
OSCAR ZARISKI (PS)	1981	EE.UU.	3
HASSLER WHITNEY (PS)	1982	EE.UU.	2
MARK G. KREIN	1982	Ucrania	4
SHIING SHEN CHERN (PS)	1983-84	China	2
PAUL ERDŐS	1983-84	Hungría	0
KUNIHICO KODAIRA (MF)	1984-85	Japón	2
HANS LEWY	1984-85	Alemania	3
SAMUEL EILENBERG (PS)	1986	Polania	2
ATLE SELBERG (MF)	1986	Noruega	2
KIYOSHI ITO	1987	Japón	3
PETER D. LAX (PS)	1987	Hungría	3
FRIEDRICH E. HIRZEBRUCH	1988	Alemania	3
LARS HORMANDER (MF)	1988	Suecia	3
ALBERTO CALDERÓN	1989	Argentina	3
JOHN MILNOR (MF)	1989	EE.UU.	3
ENNO DE GIORGI	1990	Italia	3
ILYA PIATETSKI-SHAPIRO	1990	Rusia	3
LENNART A. CARLESON	1992	Suecia	4
JOHN G. THOMPSON (MF)	1992	EE.UU.	3
MIKHAEL GROMOV	1993	Rusia	3
JACQUES TITS	1993	Bélgica	4
JURGEN K. MOSER	1994-95	Alemania	3
ROBERT LANGLANDS	1995-96	Canadá	2
ANDREW WILES	1995-96	Inglaterra	3
JOSEPH B. KELLER	1997	EE.UU.	3
YAKOV G. SINAI	1997	Rusia	4
LÁSZLÓ LOVÁSZ	1999	Hungría	1
ELIAS M. STEIN	1999	Bélgica-EE.UU.	2

(FM): Medalla Fields

(PS): Premio Steele

TABLA 5. Cotas superiores de los números de Erdős de los ganadores del premio Wolf en matemáticas.

Desde entonces se han conferido un máximo de tres distinciones por año en las siguientes categorías:

1. Premio a la Vida y Obra de un matemático. Por la influencia acumulada de la totalidad de la contribución matemática del galardonado.
2. Exposición Matemática. Por un libro o monografía o artículo divulgativo de gran calidad.
3. Significativa Contribución Investigativa. Por un artículo, reciente o no, que haya tenido repercusiones fundamentales o duraderas en su campo.

• El Premio Wolf es concedido por la Fundación Wolf de Israel. Todos los años (desde 1978) otorga premios

Premio Nevanlinna	Año	País	# de Erdős
ROBERT TARJAN	1982	EE.UU.	2
LESLIE VALIANT	1986	Hungría/Inglaterra	3
ALEXANDER RAZBOROV	1990	Rusia	2
AVI WIGDERSON	1994	Israel	2
PETER SHOR	1998	EE.UU.	2

TABLA 6. Cotas superiores de los números de Erdős de los ganadores del premio Nevanlinna.

de 100.000 dólares por logros sobresalientes en agricultura, química, medicina, artes, matemáticas y física. El premio Wolf en matemáticas le fue conferido en 1984 a PAUL ERDŐS; aparte de sus contribuciones a muchas áreas de la matemática, la citación oficial añade "por inspirar personalmente a matemáticos de todo el mundo".

• El Premio Rolf Nevanlinna se entrega cada cuatro años, al igual que la Medalla Fields, durante el Congreso Internacional de Matemáticos. Se concedió por primera vez en 1982 con fondos proporcionados desde entonces por la Universidad de Helsinki. Se trata de un premio restringido, en el sentido de que se concede, en cada ocasión, solamente a un matemático joven que trabaje en el área de la informática (ciencias de la computación).

Hemos compilado tablas de números de Erdős de todos los ganadores del premio Steele, categoría vida y obra de un matemático (Tabla 4), del premio Wolf en matemáticas (Tabla 5) y del premio Nevanlinna (Tabla 6), y hemos encontrado que todos ellos son ≤ 5 . El lector es, de nuevo, referido a la página Web [89] para los correspondientes grafos de colaboración.

5. ¿Hasta dónde se extiende la conexión Erdős?

En esta sección veremos primero cómo están representadas las diferentes áreas de la matemática en la componente de ERDŐS de C . Consideraremos luego otras disciplinas académicas en nuestro esfuerzo por determinar el alcance de la conexión ERDŐS fuera del mundo matemático.

Tanto *Mathematical Reviews* (MR) [124] como *Zentralblatt für Mathematik* (Zbl) [165] asignan un número a cada trabajo publicado, que representa su tópico central (*subject area*). Por ejemplo, combinatoria es 05 y teoría de números es 11 (para mencionar las áreas del 80% de las publicaciones de PAUL ERDŐS). Actualmente se utilizan un total de 61 categorías generales (véase [7]). Resulta —y tal vez no sea ya sorprendente— que todas las 61 áreas de clasificación están representadas en la

componente de ERDŐS de C . De hecho, podemos decir mucho más: ERDŐS mismo publicó en por lo menos 27 de estas categorías, sus co-autores han publicado en por lo menos 32 más, y varias personas con número de ERDŐS 2 han publicado en las restantes dos (K -teoría y geofísica).

En la sección 2 exhibimos muchos científicos prestigiosos, de diversas especialidades, cuyo número de ERDŐS es finito. Podemos ir un tanto más lejos si tenemos presente que modelos y herramientas matemáticos sofisticados se han usado de manera estándar en muchos dominios fuera de las ciencias naturales, la ingeniería y la informática. Es por eso que los editores de *Mathematical Reviews* reseñan artículos con contenido matemático de múltiples revistas provenientes de áreas como finanzas, actuaría, sicología, sociología, antropología, investigación de operaciones, administración, control de calidad, medicina, dinámica de poblaciones, etc. No es difícil encontrar individuos con números de ERDŐS relativamente pequeños y que publican en tales revistas. Por ejemplo, SCOTT A. BOORMAN, cuyo número de ERDŐS es a lo sumo 7, tiene artículos publicados en las revistas *Journal of Mathematical Psychology* y *Journal of Mathematical Sociology*; muchos de sus trabajos aparecen reseñados en *Sociological Abstracts*. PETER C. FISHBURN, co-autor de ERDŐS, ha publicado en *Management Science* y en *Theory and Decision, An International Journal for Methods and Models in the Social and Decision Sciences*.

Ciertamente cientos, si no miles, de estadísticos tienen números de ERDŐS finitos, y es usual encontrarlos como co-autores en los trabajos que surgen de sus consultorías.

Pero probablemente la fuente más fecunda de enlaces con otras disciplinas es FRANK HARARY, co-autor de PAUL ERDŐS, y quien, a su vez, tiene más de 270 co-autores. HARARY nos ha informado¹¹ que ha publicado con antropólogos, arquitectos, biólogos, químicos, economistas, ingenieros, geógrafos, periodistas (incluyendo a un sobrino segundo del escritor JAMES JOYCE), médicos, filósofos, físicos (como GEORGE UHLENBECK), escritores científicos (como MARTIN GARDNER), analistas políticos, sicólogos y sociólogos, entre otros. Sus artículos aparecen en revistas muy variadas (y que son reseñadas por MR) tales como *Behavioral Science*, *The Journal of Mathematical Psychology*, *The Journal of Mathematical Sociology*, *The Journal of*

Theoretical Biology, *Mind*, *Psychometrika*, *Social Networks*, *Sociometry*, *American Antiquity*, *Current Anthropology*, *The Journal of Chemical Documentation*, *Language*, *The Journal of Social Psychology* y *Oceania*.

Es claro que la búsqueda de colaboraciones en otras disciplinas requiere un trabajo más exhaustivo y sistemático.

6. Observaciones finales y preguntas abiertas

A priori podría pensarse que, para que un matemático ingrese a la componente de ERDŐS de C , es necesario que tenga muchos co-autores. Pero una de las conclusiones importantes que hemos podido extraer al recopilar información para el presente artículo, es que lo que realmente importa no es *con cuántos* se publica sino *con quiénes* se publica. O para decirlo de manera displicente, la *calidad* tiene más peso que la *cantidad*. Podemos ilustrarlo con un ejemplo más dramático que los que hasta ahora hemos presentado: el caso del gran lógico austriaco KURT GÖDEL. Por su número de artículos conjuntos, GÖDEL está en el otro extremo del espectro con respecto a ERDŐS: ¡sólo escribió uno! (véase [83]), la nota de una página (en alemán) que publicó con KARL MENGER y ABRAHAM WALD [84] referente a la concepción de MENGER sobre las geometrías diferencial y proyectiva. Sucede que el número de ERDŐS de WALD es 2; por consiguiente, a pesar de su "precario" número de artículos conjuntos, GÖDEL inscribe su nombre en la componente de ERDŐS de C y lo hace con un número de ERDŐS bastante pequeño.

Concluimos con algunas preguntas abiertas que, aun en la era de los supercomputadores y la autopista mundial de la información, son extremadamente difíciles de responder. Las primeras dos ya habían sido formuladas en [94] pero su posible respuesta no se vislumbra.

- En el grafo de colaboración C , ¿cuál es la segunda componente más grande (medida por el número de sus vértices)? Si nos restringimos solamente a matemáticos, la segunda componente más grande no es probablemente muy extensa, pero es perfectamente concebible que haya grandes componentes en otras disciplinas.
- ¿Cuáles son el radio y el diámetro de la componente de ERDŐS de C (en términos técnicos)? Aquí también, la pregunta es interesante en el caso general o en su restricción a los matemáticos.

¹¹Comunicación privada.

- El número *Nobel-Erdős* es, en un momento determinado, el número de premios Nobel que tienen un número de ERDŐS finito. Este número cambia en la medida en que se conceden nuevos premios y aparecen nuevas publicaciones conjuntas. Hemos establecido que el número *Nobel-Erdős* es ≥ 66 (véase la Tabla 1) pero su valor exacto (por ejemplo, en junio de 1999) no se conoce. Es casi seguro que nuestra cota superior se pueda refinar ostensiblemente.
- El *alcance Erdős* mide qué tan lejos llega en la historia la conexión con PAUL ERDŐS. Más precisamente, podemos definir el 'alcance ERDŐS' como el más pequeño número que representa el año de nacimiento de una persona con un número de ERDŐS finito. Todo lo que por ahora podemos decir es que dicho número no es mayor de 1849, el año de nacimiento de GEORG FROBENIUS (1849-1917), el algebrista alemán que hizo importantes contribuciones a la teoría de grupos. Desarrolló la mayor parte de la teoría de grupos finitos de sustituciones lineales en colaboración con ISSAI SCHUR (1875-1941) [77]. Resulta que el número de ERDŐS de SCHUR es 2 por su memoria conjunta [153] de 1925 con GABOR SZEGŐ, uno de los co-autores de ERDŐS.

No sabemos si el 'alcance ERDŐS' nos lleve hasta comienzos del siglo XIX o más atrás; de lo que sí podemos estar seguros es de que la conexión ERDŐS irradiará por siempre el futuro.

Agradecimientos. Después de la aparición de la versión en inglés de este artículo en *The Mathematical Intelligencer* hemos recibido mensajes electrónicos de algunos lectores, en los que nos informan sobre nuevas conexiones o trayectorias más cortas. Parte de esa información ha sido incorporada al presente texto. Queremos agradecer a DORON ZEILBERGER (Temple University, EE.UU.) por la conexión con LARS ONSAGER, a KEITH F. TAYLOR (University of Saskatchewan, Canadá) por la conexión con KENICHI FUKUI y a SIMON LEVIN (Princeton University, EE.UU.) por los datos bibliográficos que nos permitieron reducir los números de ERDŐS de P. SAMUELSON y R. SOLOW.

El primer autor desea expresar sus agradecimientos a los profesores VÍCTOR ALBIS y JAIRO CHARRIS, cuyas observaciones mejoraron considerablemente la presente versión.

REFERENCIAS

- [1] K. ALDER, A. BOHR, T. HUUS, B. MOTTELSON & A. WINTHER, *Study of nuclear structure by electromagnetic excitation with accelerated ions*, Rev. Modern Physics **28** (1956), 432-542.
- [2] MANUEL ALFONSECA, *Grandes Científicos de la Humanidad*, Espasa Calpe, Madrid, 1999.
- [3] R. A. ALPHER, H. BETHE & G. GAMOW, *The origin of chemical elements*, Phys. Rev. (2) **73** (1948), 803-804.
- [4] LUIS W. ALVAREZ, WALTER ALVAREZ, FRANK ASARO & HELEN V. MICHEL, *Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction: experimental results and theoretical interpretation*, Science **208** (1980), no. 4448, 1095-1108.
- [5] LUIS ALVAREZ-GAUME & EDWARD WITTEN, *Gravitational anomalies*, Nuclear Phys. B **234** (1984), no. 2, 269-330.
- [6] American Mathematical Society, *The Leroy P. Steele Prizes*, Internet page: <http://www.ams.org/ams/prizes.html#steele>.
- [7] American Mathematical Society, *1991 Mathematics Subject Classification*, Internet page: <http://www.ams.org/msc/>.
- [8] S. ARIMOTO, K. FUKUI, K. TAYLOR & P. MEZEY, *Structural Analysis of Certain Linear Operators Representing Chemical Network Systems via the Existence and Uniqueness Theorems of Spectral Resolution IV*, International J. of Quantum Chemistry **67** (1998) 57-69.
- [9] KENNETH J. ÁRROW, SAMUEL KARLIN, HERBERT SCARF, et al., *Studies in the Mathematical Theory of Inventory and Production*, Stanford University Press, 1958.
- [10] K. J. ARROW, H. B. CHENERY, B. S. MINHAS & R. M. SOLOW, *Capital-Labor Substitution and Economic Efficiency*, The Review of Economics and Statistics **58** no. 3, August 1961.
- [11] YEHOASHUA BAR-HILLEL & RUDOLF CARNAP, *Semantic information*, British J. Philos. Sci. **4** (1953), 147-157.
- [12] Y. BAR-HILLEL, M. PERLES & E. SHAMIR, *On formal properties of simple phrase structure grammars*, Z. Phonetik Sprachwiss. Kommunikat. **14** (1961), 143-172.
- [13] M. BARANGER, H. A. BETHE & R. P. FEYNMAN, *Relativistic correction to the Lamb shift*, Phys. Rev. (2) **92** (1953), 482-501.
- [14] J. BARDEEN & W. H. BRATTAIN, *Physical principles involved in transistor action*, Phys. Rev. (2) **75** (1949), 1208-1225.
- [15] J. BARDEEN, L. N. COOPER & J. R. SCHRIEFFER, *Microscopic theory of superconductivity*, Phys. Rev. (2) **106** (1957) 162-164.
- [16] J. BARDEEN, L. N. COOPER & J. R. SCHRIEFFER, *Theory of superconductivity*, Phys. Rev. (2) **108** (1957) 1175-1204.
- [17] JOHN BARDEEN & DAVID PINES, *Electron-phonon interactions in metals*, Phys. Rev. (2) **99** (1955), 1140-1150.
- [18] J. BARDEEN & W. SHOCKLEY, *Scattering of electrons in crystals in the presence of large electric fields*, Phys. Rev. (2) **80** (1950), 69-71.
- [19] M. BECKMANN & T. MARSCHAK, *An activity analysis approach to location theory*, in *Proc. Second Symposium in Linear Programming (Washington, DC, 1955)*, National Bureau of Standards, Washington, D.C., pp. 331-379.
- [20] EVERT W. BETH & JEAN PIAGET, *Mathematical Epistemology and Psychology*, D. Reidel Publishing Co., 1966.

- [21] DAVID BOHM & DAVID A. PINES, *A collective description of electron interactions. I, II, III*, Phys. Rev. (2) **82** (1951), 625–634; **85** (1952), 338–353; **92** (1953), 609–625.
- [22] A. BOHR, B. R. MOTTelson & D. PINES, *Possible analogy between the excitation spectra of nuclei and those of the superconducting metallic state*, Phys. Rev. (2) **110** (1958), 936–938.
- [23] HARALD BOHR & BORGE JESSEN, *Mean motions and almost periodic functions*, in *Analyse Harmonique, Colloques Internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique*, no. 15, pp. 75–84, Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, 1949.
- [24] NIELS BOHR & DIRK COSTER, Zeit. Physik **32** (1923), 342.
- [25] NIELS BOHR, H. A. KRAMERS & J. C. SLATER, Phil. Mag. **42** (1924), 785.
- [26] NIELS BOHR & JOHN ARCHIBALD WHEELER, *The mechanism of nuclear fission*, Phys. Rev. (2) **56** (1939), 426–450.
- [27] MAX BORN, W. HEISENBERG & P. JORDAN, *Zur Quantenmechanik. II*, Zeit. Physik **35** (1926), 557–615.
- [28] MAX BORN & T. VON KÁRMÁN, *Zur Theorie der spezifischen Wärme*, Phys. Zeitschr. **14** (1913), 15–19.
- [29] MAX BORN & MAX VON LAUE, Phys. Zeitschr. **24** (1923), 49–53.
- [30] MAX BORN & NORBERT WIENER, *A new formulation of the laws of quantization for periodic and aperiodic phenomena*, J. Math. Phys. **5** (1926), 84–98.
- [31] NICOLAS BOURBAKI, *Éléments d'histoire des mathématiques*, Hermann Editeurs, 1969.
- [32] *Britannica CD-97*, Encyclopædia Britannica, Inc., 1997.
- [33] W. M. BROBECK, E. O. LAWRENCE, K. R. MACKENZIE, E. M. McMILLAN, R. SERBER, D. C. SEWELL, K. M. SIMPSON & R. L. THORNTON, *Initial performance of the 184-inch cyclotron of the University of California*, Phys. Rev. (2) **71** (1947), 449–450.
- [34] LOUIS DE BROGLIE, DAVID BOHM, PIERRE HILLION, FRANCIS HALBWACHS, TAKEHIKO TAKABAYASI & JEAN-PIERRE VIGIER, *Rotator model of elementary particles considered as relativistic extended structures in Minkowski space*, Phys. Rev. (2) **129** (1963), 438–450.
- [35] P. CANDELAS, GARY T. HOROWITZ, ANDREW STROMINGER & EDWARD WITTEN, *Vacuum configurations for superstrings*, Nuclear Phys. B **258** (1985), no. 1, 46–74.
- [36] O. CHAMBERLAIN, E. SEGRÈ & C. WIEGAND, *Experiments on proton-proton scattering from 120 to 345 Mev*, Phys. Rev. (2) **83** (1951), 923–932.
- [37] A. CHARNES, W. W. COOPER & MERTON MILLER, *Dyadic programs and subdual methods*, Naval Res. Logist. Quart. **8** (1961), 1–23.
- [38] A. CHARNES, FRED GLOVER & D. KLINGMAN, *The lower bounded and partial upper bounded distribution model*, Naval Res. Logist. Quart. **18** (1971), 277–281.
- [39] J. G. CHARNEY, R. FJÖRTOFT & J. VON NEUMANN, *Numerical integration of the barotropic vorticity equation*, Tellus **2** (1950), 237–254.
- [40] N. CHOMSKY & M. P. SCHUTZENBERGER, *The algebraic theory of context-free languages*, in *Computer programming and formal systems*, North-Holland, 1963, 118–161.
- [41] J. D. COLE, H. B. KELLER & P. G. SAFFMAN, *The flow of a viscous compressible fluid through a very narrow gap*, SIAM J. Appl. Math. **15** (1967) 605–617.
- [42] DIRK COSTER & GEORGE DE HEVESY, Nature **111** (1923), 79.
- [43] F. H. C. CRICK, J. S. GRIFFITH & L. E. ORGEL, *Codes without commas*, Proc. Nat. Acad. Sci. U. S. A. **43** (1957), 416–421.
- [44] M. CURIE, H. A. LORENTZ & A. EINSTEIN, *The establishment of an international bureau of meteorology*, Science **65** (1927), 415–417.
- [45] R. H. DALITZ & F. J. DYSON, *Renormalization in the new Tamm-Dancoff theory of meson-nucleon scattering*, Phys. Rev. (2) **99** (1955), 301–314.
- [46] R. H. DALITZ & D. G. RAVENHALL, *On the Tomonaga method for intermediate coupling in meson field theory*, Philos. Mag. (7) **42** (1951), 1378–1383.
- [47] R. H. DALITZ, M. K. SUNDARESEN & H. A. BETHE, *A singular integral equation in the theory of meson-nucleon scattering*, Proc. Cambridge Philos. Soc. **52** (1956), 251–272.
- [48] RODRIGO DE CASTRO, *Sobre el número de Erdős*, Lect. Mat. **17** (1996), 163–179.
- [49] GERARD DEBREU, *Theory of value: an axiomatic analysis of economic equilibrium*, Cowles Foundation for Research in Economics at Yale University, Monograph 17, John Wiley, 1959.
- [50] GERARD DEBREU & TJALLING C. KOOPMANS, *Additively decomposed quasiconvex functions*, Math. Programming **24** (1982), no. 1, 1–38.
- [51] GERARD DEBREU & HERBERT SCARF, *The limit of the core of an economy*, in *Decision and Organization*, North Holland, 1972, pp. 283–295.
- [52] P. DEBIJE [PETER DEBYE] & A. SOMMERFELD, *Theorie des lichtelektrischen Effektes vom Standpunkte des Wirkungsquantums*, Ann. Physik **41** (1913), 873–930.
- [53] P. DEBYE & LINUS PAULING, *The inter-ionic attraction theory of ionized solutes. IV. The influence of variation of dielectric constant on the limiting law for small concentrations*, J. Am. Chem. Soc. **47** (1925), 2129–2134.
- [54] XIAO TIE DENG & CHRISTOS H. PAPADIMITRIOU, *On path lengths modulo three*, J. Graph Theory **15** (1991), no. 3, 267–282.
- [55] KEITH DEVLIN, *A Nobel formula*, Internet page: <http://www.maa.org/devlin/devlin.11.97.html>.
- [56] OTTO DIELS & KURT ALDER, *Synthesen in der hydroaromatischen Reihe*, Justus Liebigs Annalen der Chemie **460** (1928), 98–122.
- [57] P. A. M. DIRAC, V. A. FOCK & BORIS PODOLSKY, *On quantum electrodynamics*, Physik. Zeits. Sowjetunion **2**, no. 6 (1932), 468–479.
- [58] MARC DUPUIS, ROBERT M. MAZO & LARS ONSAGER, *Surface specific heat of an isotropic solid at low temperatures*, J. Chem. Phys. **33** (1960), 1452–1461.
- [59] P. EHRENFEST & R. OPPENHEIMER, *Note on the statistics of nuclei*, Phys. Rev. (2) **37** (1931), 333–338.
- [60] SAMUEL EILENBERG & M. P. SCHUTZENBERGER, *On pseudovarieties*, Advances in Math. **19** (1976), no. 3, 413–418.
- [61] A. EINSTEIN & P. EHRENFEST, *Quantentheoretische Bemerkungen zum Experiment von Stern und Gerlach*, Z. Phys. **11** (1922), 31–34.
- [62] ALBERT EINSTEIN & SIGMUND FREUD, *Warum Krieg? Ein Briefwechsel*, Institut International de Coopération Intellectuelle, 1933.

- [63] ALBERT EINSTEIN & HANS MÜHSAM, *Experimentelle Bestimmung der Kanalweite von Filtern*, Deutsch. med. Wochenschr. **49** (1923), 1012–1013.
- [64] A. EINSTEIN & W. PAULI, *On the non-existence of regular stationary solutions of relativistic field equations*, Ann. Math. (2) **44** (1943), 131–137.
- [65] A. EINSTEIN, B. PODOLSKY & N. ROSEN, *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*, Phys. Rev. (2) **47** (1935), 777–780.
- [66] A. EINSTEIN & O. STERN, *Einige Argumente für die Annahme einer molekularen Agitation beim absoluten Nullpunkt*, Ann. Phys. Lpz. (4) **40** (1913), 551–560.
- [67] M. FERENTZ, M. GELL-MANN & D. PINES, *The giant nuclear dipole resonance*, Phys. Rev. (2) **92** (1953), 836–837.
- [68] E. FERMI & E. SEGRÈ, *Zur Theorie der Hyperfeinstruktur*, Zeit. Physik **82** (1933), 729–749.
- [69] E. FERMI, E. TELLER & V. WEISSKOPF, *The decay of negative mesotrons in matter*, Phys. Rev. (2) **71** (1947), 314–315.
- [70] ENRICO FERMI & GEORGE E. UHLENBECK, *On the recombination of electrons and positrons*, Phys. Rev. (2) **44** (1933), 510–511.
- [71] E. FERMI & C. N. YANG, *Are messons elementary particles?*, Phys. Rev. (2) **76** (1949), 1739–1743.
- [72] GUILLERMO FERREYRA, *The Mathematics Behind the 1997 Nobel Prize in Economics*, Internet page: www.ams.org/new-in-math/black-scholes-ito.html.
- [73] R. P. FEYNMAN, M. GELL-MANN & G. ZWEIG, *Group $U(6) \otimes U(6)$ generated by current components*, Phys. Rev. Lett. **13** (1964), 678–680.
- [74] M. FLATO, C. PIRON, J. GREA, D. STERNHEIMER & J.-P. VIGIER, *Are Bell's inequalities concerning hidden variables really conclusive?*, Helv. Phys. Acta **48** (1975), no. 2, 219–225.
- [75] G. W. FORD, J. T. LEWIS & R. F. O'CONNELL, *Quantum oscillator in a blackbody radiation field*, Phys. Rev. Lett. **55** (1985), no. 21, 2273–2276.
- [76] K. O. FRIEDRICH & H. B. KELLER, *A finite difference scheme for generalized Neumann problems*, in *Numerical Solution of Partial Differential Equations* (Proc. Sympos. Univ. Maryland, 1965), Academic Press, 1966, pp. 1–19.
- [77] G. FROBENIUS & I. SCHUR, *Über die Äquivalenz der Gruppen linearer Substitutionen*, Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin (1906), 209–217.
- [78] W. H. FURRY & N. F. RAMSEY, *Significance of potentials in quantum theory*, Phys. Rev. (2) **118** (1960), 623–626.
- [79] WILLIAM H. GATES & CHRISTOS H. PAPADIMITRIOU, *Bounds for sorting by prefix reversal*, Discrete Math. **27** (1979), no. 1, 47–57.
- [80] G. W. GIBBONS, S. W. HAWKING, GARY T. HOROWITZ & M. J. PERRY, *Positive mass theorems for black holes*, Comm. Math. Phys. **88** (1983), no. 3, 295–308.
- [81] SHELDON L. GLASHOW & MURRAY GELL-MANN, *Gauge theories of vector particles*, Ann. Physics **15** (1961), 437–460.
- [82] S. L. GLASHOW & D. J. KLEITMAN, *Baryon resonances in W_3 symmetry*, Phys. Lett. **11** (1964), 84–86.
- [83] KURT GÖDEL, *Collected Works*, edited by S. FEFERMAN, Oxford University Press, 1986.
- [84] KURT GÖDEL, K. MENGER & A. WALD, *Diskussion über koordinatenlose Differentialgeometrie*, Ergebnisse eines mathematischen Kolloquiums **5** (1933), 25–26.
- [85] CASPER GÖFFMAN, *And what is your Erdős number?*, Amer. Math. Monthly **76** (1969), 791.
- [86] JEFFREY GOLDSTONE, ABDUS SALAM & STEVEN WEINBERG, *Broken symmetries*, Phys. Rev. (2) **127** (1962), 965–970.
- [87] NELSON GOODMAN & W. V. QUINE, *Steps toward a constructive nominalism*, J. Symbolic Logic **12** (1947), 105–122.
- [88] RONALD L. GRAHAM & JAROSLAV NEŠETŘIL, editors, *The Mathematics of Paul Erdős*, vols. I–II, Algorithms and Combinatorics **13–14**, Springer-Verlag, 1997.
- [89] JERROLD W. GROSSMAN, *The Erdős Number Project World Wide Web Site*, <http://www.oakland.edu/~grossman/erdoshp.html>.
- [90] JERROLD W. GROSSMAN, *List of people with Erdős Number at most 2*, available in [89] and via anonymous ftp to vela.acs.oakland.edu in directory `pub/math/erdos`, Oakland University, Rochester, MI, 1998 (updated annually).
- [91] JERROLD W. GROSSMAN, preparer, *List of publications of Paul Erdős*, in [88], pp. 477–573.
- [92] JERROLD W. GROSSMAN, *Paul Erdős: the master of collaboration*, in [88], pp. 467–475.
- [93] JERROLD W. GROSSMAN, *Review of [48]*.
- [94] JERROLD W. GROSSMAN & PATRICK D. F. ION, *On a portion of the well-known collaboration graph*, Proc. 26th South-eastern Inter. Conf. on Combinatorics, Graph Theory and Computing (Boca Raton, FL, 1995), Congr. Numer. **108** (1995), 129–131.
- [95] FRED GROSS & HERBERT HAUPTMAN, *On a functional equation related to the Weierstrass sigma function*, Indian J. Pure Appl. Math. **5** (1974), no. 11, 1022–1032.
- [96] S. GUDDER & C. PIRON, *Observables and the field in quantum mechanics*, J. Mathematical Phys. **12** (1971), 1583–1588.
- [97] BEAT HAHN, D. G. RAVENHALL & ROBERT HOFSTADTER, *High-energy electron scattering and the charge distributions of selected nuclei*, Phys. Rev. (2) **101** (1956), 1131–1142.
- [98] JOHN C. HARSANYI & REINHARD SELTEN, *A generalized Nash solution for two-person bargaining games with incomplete information*, Management Sci. **18** (1971/72), P80–P106.
- [99] H. HAUPTMAN & J. KARLE, *Rational dependence and the renormalization of structure factors for phase determination*, Acta Cryst. **12** (1959), 846–850.
- [100] STEVE J. HEIMS, *John von Neumann and Norbert Wiener*, MIT Press, 1980.
- [101] S. W. HAWKING & R. PENROSE, *The singularities of gravitational collapse and cosmology*, Proc. Roy. Soc. London Ser. A **314** (1970), 529–548.
- [102] WERNER HEISENBERG & A. SOMMERFELD, Zeit. Physik **31** (1922), 131.
- [103] D. HILBERT, J. v. NEUMANN & L. NORDHEIM, *Über die Grundlagen der Quantenmechanik*, Math. Ann. **98** (1927), 1–30.
- [104] M. HILLERY, R. F. O'CONNELL, M. O. SCULLY & E. P. WIGNER, *Distribution functions in physics: fundamentals*, Phys. Rep. **106** (1984), no. 3, 121–167.

- [105] J. HOFBAUER, J. MALLET-PARET & H. L. SMITH, *Stable periodic solutions for the hypercycle systems*, J. Dynamics Differential Equations **3** (1991), no. 3, 423–436.
- [106] A. J. HOFFMAN & H. M. MARKOWITZ, *A note on shortest path, assignment, and transportation problems*, Naval Res. Logist. Quart. **10** (1963), 375–379.
- [107] PAUL HOFFMAN, *The Man Who Loved Only Numbers*, Hyperion, 1998.
- [108] International Mathematical Union, *Fields Medals and Rolf Nevanlinna Prize*, Internet page: <http://elib.zib.de/IMU/medals>.
- [109] *Jahrbuch über die Fortschritte der Mathematik*, 1868–1942, Berlin.
- [110] JOHN H. KAGEL & ALVIN E. ROTH, editors, *The Handbook of Experimental Economics*, Princeton University Press, 1995.
- [111] B. KAUFMAN & LARS ONSAGER, *Crystal statistics III. Short-Range order in a binary Ising lattice*, Phys. Rev. **76** (1949), 1244.
- [112] JOHN G. KEMENY, OSKAR MORGENSTERN & GERALD L. THOMPSON, *A generalization of the von Neumann model of an expanding economy*, Econometrica **24** (1956), 115–135.
- [113] TJALLING C. KOOPMANS & MARTIN BECKMANN, *Assignment problems and the location of economic activities*, Econometrica **25** (1957), 53–76.
- [114] H. A. KRAMERS & W. PAULI, *Zur theorie der banden spek-tren*, Zeit. Physik **13** (1923), 351–367.
- [115] W. D. KRENTEL, J. C. C. MCKINSEY & W. V. QUINE, *A simplification of games in extensive form*, Duke Math. J. **18** (1951), 885–900.
- [116] TSUNG-DAO LEE & DAVID PINES, *Interaction of a nonrelativistic particle with a scalar field with application to slow electrons in polar crystals*, Phys. Rev. (2) **92** (1953) 883–889.
- [117] T. D. LEE & C. N. YANG, *Parity nonconservation and a two-component theory of the neutrino*, Phys. Rev. (2) **105** (1957), 1671–1675.
- [118] T. D. LEE & C. N. YANG, *Question of parity conservation in weak interactions*, Phys. Rev. (2) **104** (1956), 254–258.
- [119] T. D. LEE & C. S. WU, *Weak interactions*, Annual Rev. Nuclear Sci., **15** (1965), 381–476.
- [120] J. T. LEWIS, JAMES MCCONNELL & B. K. P. SCAIFE, *Relaxation effects in rotational Brownian motion*, Proc. Roy. Irish Acad. Sect. A **76** (1976), no. 7, 43–69.
- [121] *MacTutor History of Mathematics*, Internet page: <http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/>
- [122] ZVONKO MARIC, KARL POPPER & JEAN-PIERRE VIGIER, *Violation of Heisenberg's uncertainty relations on individual particles within subset of γ photons in $e^+e^- \rightarrow 2\gamma$ pair creation*, Found. Phys. Lett. **1** (1988), no. 4, 321–332.
- [123] THOMAS MARSCHAK & REINHARD SELTEN, *General Equilibrium with Price-making Firms*, Springer-Verlag, 1974.
- [124] *Mathematical Reviews*, American Mathematical Society, 1940–.
- [125] JOHN MAYNARD SMITH, *Evolution and the Theory of Games*, Cambridge University Press, 1982.
- [126] J. MAYNARD SMITH, *The theory of games and the evolution of animal conflict*, J. Theor. Biol. **47** (1974), no. 1, 209–221.
- [127] J. MAYNARD SMITH & JOSEF HOFBAUER, *The "battle of the sexes": a genetic model with limit cycle behavior*, Theoret. Population Biol. **32** (1987), no. 1, 1–14.
- [128] JAMES MCCONNELL & ERWIN SCHRÖDINGER, *The shielding effect of planetary magnetic fields*, Proc. Roy. Irish Acad. Sect. A **49** (1944), 259–273.
- [129] ROBERT C. MERTON & P. A. SAMUELSON, *A complete model of warrant pricing that maximizes utility*, Industrial Management Review **10** (1969), 17–46.
- [130] FRANCO MODIGLIANI & MERTON MILLER, *The cost of capital, corporation finance and the theory of investment*, Amer. Economic Review **48** (1958):
- [131] FRANCO MODIGLIANI & MERTON MILLER, *Dividend policy, growth and the valuation of shares*, Journal of Business **34** (1961).
- [132] C. Y. MOU, G. NICOLIS, & R. M. MAZO, *Some comments on nonequilibrium phase transitions in chemical systems*, J. Statist. Phys. **18** (1978), no. 1, 19–38.
- [133] GERT H. MULLER, WOLFGANG LENSKI, et al., editors, *Ω -Bibliography of Mathematical Logic*, vols. I–VI, Springer-Verlag, 1987.
- [134] J. F. NASH & L. S. SHAPLEY, *A simple three-person poker game*, in *Contributions to the Theory of Games*, Princeton University Press, 1950, pp. 105–116.
- [135] A. NORDSIECK, W. E. LAMB, JR. & G. E. UHLENBECK, *On the theory of cosmic-ray showers. I. The Furry model and the fluctuation problem*, Physica **7** (1940), 344–360.
- [136] J. R. OPPENHEIMER & R. SERBER, *On the stability of stellar neutron cores*, Phys. Rev. (2) **54** (1938), 540.
- [137] J. R. OPPENHEIMER & H. SNYDER, *On continued gravitational contraction*, Phys. Rev. (2) **56** (1939), 455–459.
- [138] L. S. ORNSTEIN & H. A. KRAMERS, *Zur kinetischen Herleitung des Fermischen Verteilungsgesetzes*, Zeit. Physik **42** (1927), 481–486.
- [139] L. S. ORNSTEIN & F. ZERNIKE, Proc. K. Ak. Amsterdam **28** (1919), 280.
- [140] ABRAHAM PAIS, 'Subtle is the Lord...': *The Science and Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, 1982.
- [141] DAVID PINES & J. ROBERT SCHRIEFFER, *Collective behavior in solid-state plasmas*, Phys. Rev. (2) **124** (1961), 1387–1400.
- [142] BORIS PODOLSKY & LINUS PAULING, *The momentum distribution in hydrogen-like atoms*, Phys. Rev. (2) **34** (1929), 109–116.
- [143] I. PRIGOGINE, G. NICOLIS, R. HERMAN & T. LAM, *Stability, fluctuations and complexity*, Collect. Phenom. **2** (1975), no. 2, 103–109.
- [144] I. I. RABI, N. F. RAMSEY & J. SCHWINGER, *Use of rotating coordinates in magnetic resonance problems*, Rev. Modern Physics **26** (1954), 167–171.
- [145] L. J. RAINWATER & C. S. WU, Nucleonics **1** (1947), 60.
- [146] I. W. ROXBURGH, J. S. GRIFFITH & P. A. SWEET, *On models of non spherical stars. I. The theory of rapidly rotating main sequence stars*, Z. Astrophys. **61** (1965) 203–221
- [147] I. W. ROXBURGH & P. G. SAFFMAN, *The growth of condensations in a Newtonian model of the steady-state universe*, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **129** (1965), 181–189.
- [148] ABDUS SALAM & W. GILBERT, *On generalized dispersion relations. II*, Nuovo Cimento (10) **3** (1956), 607–611.
- [149] ABDUS SALAM & J. C. WARD, *Weak and electromagnetic interactions*, Nuovo Cimento (10) **11** (1959), 568–577.
- [150] E. E. SALPETER & H. A. BETHE, *A relativistic equation for bound-state problems*, Phys. Rev. (2) **84** (1951), 1232–1242.

- [151] P. A. SAMUELSON & R. M. SOLOW, *Balanced Growth under Constant Returns to Scale*, 1953, *Econometrica*.
- [152] BRUCE SCHECHTER, *My Brian Is Open: The Mathematical Journeys of Paul Erdős*, Simon & Schuster, 1998.
- [153] I. SCHUR & G. SZEGÖ, *Über die Abschnitte einer im Einheitskreise beschränkten Potenzreihe*, *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften* 1925, *Physikalisch-Mathematische Klasse*, 545-560.
- [154] G. T. SEABORG & E. SEGRÈ, *Nuclear isomerism in element 43*, *Phys. Rev. (2)* **55** (1939), 808-814.
- [155] C. E. SHANNON, *A mathematical theory of communication*, *Bell System Tech. J.* **27** (1948), 379-423, 623-656.
- [156] C. E. SHANNON, R. G. GALLAGER & E. R. BERLEKAMP, *Lower bounds to error probability for coding on discrete memoryless channels. I*, *Information and Control* **10** (1967) 65-103.
- [157] CLAUDE E. SHANNON & WARREN WEAVER, *The Mathematical Theory of Communication*, University of Illinois Press, 1949.
- [158] LLOYD SHAPLEY & HERBERT SCARF, *On cores and indivisibility*, *J. Math. Econom.* **1** (1974), 23-37.
- [159] L. C. THOMAS, *Games, Theory and Applications*, Ellis Horwood Ltd., 1984.
- [160] G. E. UHLENBECK & S. GOUDSMIT, *Ersetzung der Hypothese vom unmechanischen Zwang durch eine Forderung bezüglich des inneren Verhaltens jedes einzelnen Elektrons*, *Naturwiss.* **13** (1925), 953-954.
- [161] JOHN VON NEUMANN, *Collected Works*, Pergamon Press, 1961-1963.
- [162] JOHN VON NEUMANN & OSKAR MORGENSTERN, *Theory of Games and Economic Behaviour*, Princeton University Press, 1944.
- [163] JOHN ARCHIBALD WHEELER & RICHARD PHILLIPS FEYNMAN, *Classical electrodynamics in terms of direct inter-particle action*, *Rev. Modern Physics* **21** (1949), 425-433.
- [164] EDMUND WHITTAKER, *A History of the Theories of Aether and Electricity*, Dover Publications Inc., 1989.
- [165] *Zentralblatt für Mathematik und Ihre Grenzgebiete*, Springer, 1931-.

SOME FURTHER REMARKS ON THE LOCAL PATH-CONNECTEDNESS OF COMPACTIFICATIONS

by

Jairo A. Charris¹ & Carmenza Moreno Roa²

Resumen

Charris, J. & C. Moreno-Roa: Some further remarks on the local path-connectedness of compactifications. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **23**(89): 583-586. 1999. ISSN 0370-3908.

Se establecen algunos resultados sobre la conexión y la arco-conexión locales de compactaciones de espacios localmente conexos por adición de conjuntos infinitos. Los resultados depende de propiedades topológicas de estos últimos conjuntos y generalizan resultados previos de los autores.

Palabras clave: Compactificaciones, conexión y arco-conexión locales, componentes conexas y arco-conexas.

Abstract

Some results are presented on the local connectedness and local path-connectedness of compactifications of a topological space by addition of an infinite set of points. The results depend on topological properties of this latter set and generalize previous results.

Key words: Compactifications, local connectedness and local path-connectedness, connected components and path-components

1. Introduction

If X is a topological space ([1], p. 13) and \tilde{X} is a compact Hausdorff space ([1], p. 83, p. 93) containing X

as an open dense subset, \tilde{X} is said to be a compactification of X by addition of the set $N = \tilde{X} - X$. Observe that N is a closed subset of \tilde{X} . The space X is then Hausdorff and locally compact ([1], p. 102).

¹ Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Santa Fe de Bogotá, D.C.

² Departamento de Matemáticas y Estadística, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

In [2] it has been shown that if X is locally connected ([1], p. 129) and the set N is such that $D^{(n)}(N) = \emptyset$ for some $n \geq 0$ ($D^{(n)}(N)$ is defined inductively by $D^{(0)}(N) = N, D^{(1)}(N) = D(N)$ is the set of limit points of N , and $D^{(n)}(N) = D(D^{(n-1)}(N))$, for $n \geq 1$) then, provided \tilde{X} has only finitely many connected components ([1], p. 127), also \tilde{X} is locally connected. Furthermore, under the same assumptions, if X is locally path-connected (see [2] for the appropriate definitions) and any point $\omega \in N$ has a countable fundamental system of neighborhoods in \tilde{X} , then \tilde{X} is also locally path-connected. These results allowed to investigate in [2] the local connectedness and local path-connectedness properties of the compactifications of σ -compact spaces (Hausdorff spaces which are the union of countably many open subsets with compact closure) and of locally connected paracompact spaces (locally connected spaces in which the connected components are σ -compact).

As in [2], our main reference for generalities about topological and uniform spaces and their connectedness properties is [1]. See also [3]. A σ -compact space is called countable at infinity in [1], p. 106. In what follows, all topological spaces are supposed to be Hausdorff and the relevant compactifications are assumed to have only finitely many connected components (a compact space having infinitely many connected components can not be locally connected). For motivation about results on local connectedness and local path-connectedness of compactifications, see [2], [4], [5], [6], [7]. In this brief paper we examine results on these properties, mainly on local path-connectedness, which are motivated by or extend results in [2] but, in spite of some interest in their own, are not as conclusive as them. They may, however, shorten proofs or make them more accessible.

2. On local connectedness

In this section we extend results in Section 4 of [2]. We begin by observing that the basic assumption of [2], that of the compactifying set $N = \tilde{X} - X$ being such that $D^{(n)}(N) = \emptyset$ for some $n \geq 0$, points in the direction of a strong disconnectedness of this set. In fact, if $\omega \in N$ and $C_\omega(N)$ denotes the connected component of ω in N , also $D^{(n)}(C_\omega(N)) = \emptyset$, and if $1 \leq m \leq n$ is such that $D^{(m)}(C_\omega(N)) = \emptyset$ and $D^{(m-1)}(C_\omega(N)) \neq \emptyset$, the fact that $C_\omega(N)$ can not have isolated points, unless it reduces to a point, ensures that $m = 1$ and thus $C_\omega(N) = \{\omega\}$. In view of this, some results in [2], Section 4, can be considerably extended as we next show.

Observe that asserting that \tilde{X} is locally connected at $\omega \in N$ (i.e., that ω has a fundamental system of connected neighborhood in \tilde{X}) is obviously equivalent to prove that for any open neighborhoods U of ω in \tilde{X} , $\omega \notin \overline{\varepsilon_\omega(U)}$, where $\varepsilon_\omega(U) = U - C_\omega(U)$ (here and in what follows, \bar{A} , for $A \subseteq \tilde{X}$, is the closure of A in \tilde{X} ; also, A° stands for the interior of A in \tilde{X}).

Theorem 2.1 *Let X be locally connected and let \tilde{X} be a connected compactification of X by addition of a set N such that $C_\omega(N) = \{\omega\}$ for all $\omega \in N$. Then, \tilde{X} is locally connected.*

Proof. Let $\omega \in N$ and U, W be open neighborhoods of ω such that $\bar{W} \subseteq U$. Let $\varepsilon_\omega(U) = U - C_\omega(U)$ and $\varepsilon'_\omega(\bar{W}) = \varepsilon_\omega(U) \cap \bar{W}$. If $\omega \in \overline{\varepsilon_\omega(U)}$, also $\omega \in \overline{\varepsilon'_\omega(\bar{W})}$ (as W is a neighborhood of ω), and we will prove that the connected component C_ω of ω in $\overline{\varepsilon'_\omega(\bar{W})}$ meets $Fr(\bar{W}) := \bar{W} \cap \overline{\tilde{X} - \bar{W}}$. In fact, let A be a clopen (both open and closed) subset of $\overline{\varepsilon'_\omega(\bar{W})}$ such that $C_\omega \subseteq A$. Since A is open and $\omega \in A$ then $A \cap \varepsilon'_\omega(\bar{W}) \neq \emptyset$, and a connected component C of $\bar{W}, C \subseteq \varepsilon'_\omega(\bar{W})$, should exist such that $A \cap C \neq \emptyset$. Since $A \cap \varepsilon'_\omega(\bar{W})$ is clopen in $\varepsilon'_\omega(\bar{W})$ then $C \subseteq A$, and now we prove that $C \cap Fr(\bar{W}) \neq \emptyset$. Assume not. Then, for each $y \in Fr(\bar{W})$, a clopen subset B_y of \bar{W} should exist such that $C \subseteq B_y$ and $y \notin B_y$ ([1], p. 224, proposition 6). Thus $\{\bar{W} - B_y \mid y \in Fr(\bar{W})\}$ is an open covering of $Fr(\bar{W})$, and $Fr(\bar{W})$ being compact, a finite number of them, $\bar{W} - B_{y_k}, k = 1, 2, 3, \dots, n$, still covers $Fr(\bar{W})$. But then $B = \bigcap_{k=1}^n B_{y_k}$ would be clopen in \bar{W} and $B \cap Fr(\bar{W}) = \emptyset$, so that $B \subseteq \bar{W}^\circ$. This is absurd, since then B would be clopen in \tilde{X} , which is assumed to be connected. Then $C \cap Fr(\bar{W}) = \emptyset$, therefore $A \cap Fr(\bar{W}) = \emptyset$, and ([1], p. 224, proposition 6) since C_ω is the intersection of the clopen subsets of $\varepsilon'_\omega(\bar{W})$ in which it is contained (a family of closed subsets of \tilde{X} with the finite intersection property), also $C_\omega \cap Fr(\bar{W}) \neq \emptyset$. Now we prove that $C_\omega \cap (U - N) = \emptyset$. Assume not, and let $x \in C_\omega \cap (U - N)$ and C be the connected component of x in $U - N$. Then $C \cap C_\omega \neq \emptyset$, so that $C \cap C_\omega(U) \neq \emptyset$, and since C is a connected subset of U , also $C \subseteq C_\omega(U)$. Then $C \cap \varepsilon_\omega(U) = \emptyset$, and since in addition C is open, $C \cap \overline{\varepsilon_\omega(U)} = \emptyset$, so that $C \cap \overline{\varepsilon'_\omega(\bar{W})} = \emptyset$. This is contradictory. Hence $C_\omega \subseteq N$. But this is again contradictory, because then there would be $\omega' \in C_\omega \cap Fr(\bar{W})$, so that $\omega' \in N$

and $\omega' \neq \omega$, while $C_\omega \subseteq C_\omega(N) = \{\omega\}$. Therefore, $\omega \notin \varepsilon_\omega(U)$. \square

The above proof follows closely ideas in [4] and is a refinement of the proof of Lemma 4.1 in [2].

Remark 2.1 The result in Theorem 2.1 still holds if \tilde{X} is not connected but has instead, as previously mentioned, finitely many connected components. Just replace \tilde{X} by $C_\omega(\tilde{X})$ in the above proof.

Remark 2.2 If U is open, the set $\varepsilon_\omega(U) := U - C_\omega(U)$ is identical with the union $\widetilde{\varepsilon}_\omega(U)$ of the components C of U such that $\omega \notin \overline{C}$. In fact, if $x \in \varepsilon_\omega(U)$ and $C = C_x(U)$ then $\omega \notin \overline{C}$, since, on the contrary, $C \cup \{\omega\}$ would be connected and thus $C \cup \{\omega\} \subseteq C_\omega(U)$; on the other hand, if $x \in \widetilde{\varepsilon}_\omega(U)$ then x belongs to a component C of U such that $\omega \notin \overline{C}$, so that $C \neq C_\omega(U)$; hence, $x \notin C_\omega(U)$.

3. On local path-connectedness.

Now we extend Lemma 5.1 of [2]. First we observe that the condition $\omega \notin \varepsilon_\omega(U)$ for any neighborhood U of $\omega \in N$, which is necessary and sufficient for local connectedness at ω , does not seem to be related to local path-connectedness, even when ω has countable fundamental systems of neighborhoods (see [2], Remark 5.5). More relevant for such purpose seems to be the set $\mathfrak{S}_\omega(U)$, which is the union of the connected components C of $U - N$ such that $\omega \notin \overline{C}$. The definition of $\mathfrak{S}_\omega(U)$ is motivated by what was stated in Remark 2.2. We observe that for the choice of U in the proofs of [2], Lemmas 4.1 and 5.1, it is obvious that $\varepsilon_\omega(U) = \mathfrak{S}_\omega(U)$. The following three lemmas hold.

Lemma 3.1 *If U is an open neighborhood of $\omega \in N$ then $\varepsilon_\omega(U) \cap X \subseteq \mathfrak{S}_\omega(U)$ and $\varepsilon_\omega(U) \subseteq \mathfrak{S}_\omega(U)$.*

Proof. Any $x \in \varepsilon_\omega(U)$ belongs to a connected component C of U such that $\omega \notin \overline{C}$. On the other hand, x is in a connected component C' of $U - N$, and since $U - N \subseteq U$, also $C' \subseteq C$, so that $\omega \notin \overline{C'}$; thus $C' \subseteq \mathfrak{S}_\omega(U)$, which implies that $x \in \mathfrak{S}_\omega(U)$. Now let $\omega \in \varepsilon_\omega(U)$ and V be an open neighborhood of ω in \tilde{X} . Then $V \cap \varepsilon_\omega(U) \neq \emptyset$. Since $\varepsilon_\omega(U) = U - C_\omega(U)$ is open in U and therefore in \tilde{X} , $(V \cap \varepsilon_\omega(U)) \cap X = V \cap (\varepsilon_\omega(U) \cap X)$ is non-empty and contained in $V \cap \mathfrak{S}_\omega(U)$. Therefore $V \cap \mathfrak{S}_\omega(U) \neq \emptyset$, and $\omega \in \mathfrak{S}_\omega(U)$. \square

Lemma 3.2 *Assume X to be locally path-connected and that for $\omega \in N$ and any open neighborhood U of ω , $\omega \notin \mathfrak{S}_\omega(U)$. Then, \tilde{X} is locally connected at ω . Furthermore, if ω also has a countable fundamental system*

of neighborhoods, and U is an open neighborhood of ω , any point $a \in U - \mathfrak{S}_\omega(U)$, $a \in X$, can be joined to ω by means of a path in $U - \mathfrak{S}_\omega(U)$.

Proof. The first assertion follows from Lemma 3.1. Now let ω and U be as above and let $(V_n)_{n \geq 1}$ be a countable fundamental system of neighborhoods of ω . We may assume $V_{n+1} \subseteq V_n \subseteq U - \mathfrak{S}_\omega(U)$ for all $n \geq 1$. For $a = a_0 \in (U - \mathfrak{S}_\omega(U)) \cap X$ there is $a_1 \in V_1 \cap C_{a_0}(U - N)$ such that $\omega \in \overline{C_{a_1}(V_1 - N)}$; if not $V_1 \cap C_{a_0}(U - N) \subseteq \mathfrak{S}_\omega(V_1)$, and for some neighborhood $W_1 \subseteq V_1$ of ω such that $W_1 \cap \mathfrak{S}_\omega(V_1) = \emptyset$, also $W_1 \cap C_{a_0}(U - N) = \emptyset$, which, since $\omega \in \overline{C_{a_0}(U - N)}$, is absurd. The same argument shows for some $a_2 \in V_2 \cap C_{a_1}(V_1 - N)$ that $\omega \in \overline{C_{a_2}(V_2 - N)}$, and iteration allows, with $V_0 = U$, to obtain a sequence $(a_n)_{n \geq 0}$ such that $a_{n+1} \in V_{n+1} \cap C_{a_n}(V_n - N)$ and $\omega \in \overline{C_{a_n}(V_n - N)}$ for all $n \geq 0$. Since X is locally path-connected, components and paths-components of X coincide. Then, a sequence $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_n < \dots < 1$, $t_n \rightarrow 1$, and paths $\alpha_n : [t_n, t_{n+1}] \rightarrow C_{a_n}(V_n - N)$, $n \geq 0$, exist such that $\alpha_n(t_n) = a_n$, $\alpha_n(t_{n+1}) = a_{n+1}$. Observe that $\alpha_n([t_n, t_{n+1}]) \subseteq V_m$ for $m \geq 0$ and $n \geq m$, so that $\alpha : [0, 1] \rightarrow U$, defined by $\alpha(t) = \alpha_n(t)$ if $t_n \leq t \leq t_{n+1}$ and $\alpha(1) = \omega$, actually is a path in U joining a_0 and ω . As a matter of fact, $\alpha(t) \in V_n \subseteq U - \mathfrak{S}_\omega(U)$ for $n \geq 1$ and $t \geq t_n$, and since $\alpha([t_0, t_1]) \subseteq C_{a_0}(U - N)$, $C_{a_0}(U - N)$ is open in U and $C_{a_0}(U - N) \cap \mathfrak{S}_\omega(U) = \emptyset$, also $\alpha([t_0, t_1]) \subseteq U - \mathfrak{S}_\omega(U)$. Thus, α is a path in $U - \mathfrak{S}_\omega(U)$. \square

Lemma 3.3 *Let ω and U be as in the previous lemma. Then, any point $\omega' \in U_o = U - \mathfrak{S}_\omega(U)$, $\omega' \in N$, such that $\omega' \notin \mathfrak{S}_\omega(V)$ for any open neighborhood V of ω' in \tilde{X} , and admitting a countable fundamental system of neighborhoods, can be joined to ω by a path in U_o .*

Proof. Any point in $U_o \cap X$ can be so joined to ω , as shown in the previous lemma. Now assume that the assumptions hold for $\omega' \in U_o \cap N$. Again, from Lemma 3.2 it follows that any point $x \in U_1 = U_o - \mathfrak{S}_{\omega'}(U_o)$, $x \in X$, can be joined to ω' by a path in U_1 . Thus, since $U_1 \subseteq U_o$, if $U_1 \cap X \neq \emptyset$, the assertion will follow. But since U_1 is a neighborhood of ω' and ω' is in the closure of X , this is trivial. \square

The above results imply the following theorem.

Theorem 3.1 *Let \tilde{X} be a compactification of the locally path-connected space X by addition of the set*

N. Assume that any point $\omega \in N$ has a countable fundamental system of neighborhoods and that for any open neighborhood U of ω , $\omega \notin \overline{\mathfrak{S}_\omega(U)}$. Then \tilde{X} is locally path-connected.

Proof. Clearly \tilde{X} is locally connected, and from the previous lemma it follows that for any $\omega \in N$ and any open neighborhood U of ω , $U - \overline{\mathfrak{S}_\omega(U)}$ is a path-connected neighborhood of ω . \square

Remark 3.1 The proof of Theorem 3.1 follows ideas in [5]. Let \tilde{X} be a compactification of X by addition of N . A subset M of N is called *thin* if it is open in N and any $\omega \in M$ has a fundamental system $(V_n)_{n \geq 0}$ of open neighborhoods such that $\omega \notin \overline{\mathfrak{S}_\omega(V_n)}$ for all $n \geq 0$. We may assume that $V_n \cap (N - M) = \emptyset$, and it follows that if X is locally path-connected then $V_n - \overline{\mathfrak{S}_\omega(V_n)}$, $n \geq 0$, is a fundamental system of open path connected neighborhoods of ω , so that $X \cup M$ is locally path-connected. Clearly $X \cup M$ is open and dense in \tilde{X} , and therefore \tilde{X} is a compactification of $X \cup M$ by addition of $N - M$.

Remark 3.2 If \tilde{X} is a compactification of the locally path-connected space X by addition of N and if M is an open subset of N such that each $\omega \in M$ has a countable fundamental system $(V_n)_{n \geq 0}$ of open neighborhoods with $V_n - N$ having, for each n , only finitely many components, then M is thin. In fact, we may assume that $V_n \cap (N - M) = \emptyset$ for all n , and if C_1, C_2, \dots, C_m are the components of $V_n - M$ such that $\omega \notin \overline{C_k}$, $k = 1, 2, \dots, m$, then $\omega \notin \overline{\mathfrak{S}_\omega(V_n)} = \overline{C_1} \cup \dots \cup \overline{C_m}$.

In view of Remark 3.1 and Corollary 5.4 in [2], the following corollary of Theorem 3.1 holds.

Corollary 3.1 If \tilde{X} is a compactification of the locally path-connected space X by addition of the set N , if every point ω of N has a countable fundamental system of neighborhoods, and if M is a thin subset of N such that $D^{(n)}(N - M) = \emptyset$ for some $n \geq 0$, then \tilde{X} is locally path-connected.

The following example has some interesting features.

Example 3.1 Let

$$X = \{(x, n/x) \mid x \in R, x \neq 0, n \in Z, n \neq 0\}$$

be endowed with the topology of subspace of R^2 . Also let $\tilde{X} = X \cup (\{0\} \times [-\infty, +\infty]) \cup ([-\infty, +\infty] \times \{0\})$ be given the topology of subspace of $[-\infty, +\infty] \times [-\infty, +\infty]$.

Then \tilde{X} is a compactification of X by addition of the set $N = (\{0\} \times [-\infty, +\infty]) \cup ([-\infty, +\infty] \times \{0\})$. Clearly $M = (\{0\} \times R) \cup (R \times \{0\})$ is a thin subset of N and

$$N - M = \{(0, -\infty), (0, +\infty), (-\infty, 0), (+\infty, 0)\}$$

is finite, so that from Corollary 3.1, \tilde{X} is locally connected and locally path-connected. Observe however that $C_\omega(N) = N$ for each $\omega \in N$ and therefore N is not totally disconnected. This example also shows that neither condition $\omega \notin \overline{\varepsilon_\omega(U)}$ or $\omega \notin \overline{\mathfrak{S}_\omega(U)}$ implies total disconnectedness of N , and that \tilde{X} can still be locally connected or locally path-connected when this condition fails to hold for N .

Remark 3.3 We do not know as yet whether the only conditions of having countable fundamental systems of neighborhoods at $\omega \in N$ and of $\omega \notin \overline{\varepsilon_\omega(U)}$ for any neighborhood U of ω can guaranty the local path-connectedness of \tilde{X} at ω .

Remark 3.4 It is readily seen that if the space X in Example 3.1 is given the uniform structure \mathcal{U} ([1], p. 181) of subspace of $[-\infty, +\infty] \times [-\infty, +\infty]$ and $x \in X$ then $X = A_x$, where A_x is the set of points of X which can be joined to x by a V -chain ([1], p. 224) for all $V \in \mathcal{U}$. Observe, however, that X is not connected, as the case would be if X were compact ([1], p. 224, proposition 6), a result that was crucial in all considerations above.

References

- [1] N. Bourbaki, *Topologie Générale*, Chaps. I, II, 3-ième édition, Hermann, Paris, 1961.
- [2] J. A. Charris, C. Moreno and O. Mora-Valbuena, *Some remarks on the local path-connectedness of infinite point compactifications*, Rev. Acad. Colomb. Cienc. 22 (83)(1998), 221-228.
- [3] J. Dugundji, *Topology*, Allyn and Bacon, Boston, Mass., 1969.
- [4] J. de Groot and R. H. Mc Dowell, *Locally connected spaces and their compactifications*, Illinois J. Math 11 (1967), 574-582.
- [5] L. Lavalle, *The one point countable compactifications of curve-spaces and arc-spaces*, Portugaliae Mathematica 24 (1965), 105-114.
- [6] K.D. Magill, Jr., *N-point compactifications*, Amer. Math. Monthly 72 (1965), 1075-1081.
- [7] J. Margalaef, E. Outerelo & J.L. Pinilla, *Topología*, Vol III, Alhambra, Madrid, 1980.

ACTIVIDAD DE LAS ENZIMAS LIGNINOLITICAS DEL *PHANEROCHAETE CHRYSOSPORIUM* Y SU VARIACIÓN CON LA ADICIÓN DE Mn^{+2}

por

Gloria Alicia Jiménez T¹, Amanda I. Mejía G² & Betty Lucy López O³

Resumen

Jiménez T. G.A., A. I. Mejía G. & B. L. López O.: Actividad de las enzimas ligninolíticas del *Phanerochaete chrysosporium* y su variación con la adición de Mn^{+2} . Rev. Acad. Colomb. Cienc. **23**(89): 587-594, 1999. ISSN 0370-3908.

La actividad de las enzimas ligninolíticas, lignina peroxidasa (LiP), manganosa peroxidasa (MnP) y lacasa, en cultivos sumergidos de *Phanerochaete chrysosporium*, con cantidades limitadas de carbono y nitrógeno, se vio afectada por la adición de Mn^{+2} . En los cultivos con 0 y 1,25 ppm de Mn^{+2} , solo se detectó la LiP y su mayor actividad se presentó en los que contienen 1.25 ppm de Mn^{+2} . En los cultivos con 40 ppm de Mn^{+2} se encontró actividad de LiP, de MnP y lacasa. La presencia de las tres enzimas en el mismo cultivo no había sido reportada y es de gran importancia porque amplía las opciones que tiene el hongo y su maquinaria ligninolítica para actuar secuencialmente en aplicaciones biotecnológicas.

Palabras clave: Ligninoperoxidasa, manganoperoxidasa, lacasa, *Phanerochaete chrysosporium*.

Abstract

The activity of the ligninolytic enzymes, lignin peroxidase (LiP), manganese peroxidase (MnP) and laccase, in submerged cultures of *Phanerochaete chrysosporium*, with limited amounts of carbon and nitrogen, were affected by the addition of Mn^{+2} . In cultures with 0 and 1,25 ppm of Mn^{+2} , only the LiP was detected and its higher activity level was observed in the cultures with 1.25 ppm of Mn^{+2} . The cultures with 40 ppm of Mn^{+2} showed activities of LiP, MnP and laccase. The presence of the three enzymes in the same culture had not been reported and it is of great importance because it shows that the fungus and its lignolytic machinery can act sequentially.

Key words: Lignin peroxidase, manganese peroxidase, laccase, *Phanerochaete chrysosporium*.

1 Unité de Physiologie et Ecologie Microbienne, Université Libre de Bruxelles; 642 rue Engeland, 1180 Bruxelles, Belgique.

2 Facultad de Química Farmacéutica. Departamento de Farmacia. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

3 Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Departamento de Química. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. AA1226

Introducción

La degradación de la lignina por hongos de la pudrición blanca de la madera es producida por las enzimas ligninolíticas, lignina peroxidasa (LiP), (Tien *et al*, 1983; Glenn *et al*, 1983); de la manganosa peroxidasa (MnP) (Kuwahara *et al*, 1984) y de la lacasa (Morohoshi, 1990). Estas enzimas son producidas por diferentes microorganismos y su habilidad para oxidar un amplio rango de compuestos orgánicos tóxicos a metabolitos no tóxicos y/o CO₂ (Bumpus *et al*, 1987), es un tema de estudio por parte de muchos grupos de investigación, por su importancia en aplicaciones biotecnológicas.

El basidiomiceto *Phanerochaete chrysosporium* ha sido el más ampliamente estudiado. Este hongo produce durante su metabolismo secundario bajo condiciones limitadas de nitrógeno o carbono (Jeffries *et al*, 1987), un gran número de enzimas oxidativas que se encuentran en el fluido extracelular, entre ellas la LiP y la MnP. Se tenía establecido hasta hace poco que la cepa del *Phanerochaete chrysosporium* no era productora de lacasa en medios con bajo contenido de glucosa y nitrógeno. Recientemente ha sido caracterizada a partir de cultivos con celulosa como fuente de carbono y alto contenido de nitrógeno (Srinivasan, 1995) y en cultivos con suficiente glucosa y nitrógeno, suplementados con cobre (Dittmer *et al*, 1997). La lacasa se ha encontrado principalmente en otros hongos tales como *Coriolus versicolor* (Morohoshi, 1990), el *Trametes versicolor* (Bourbonnais *et al*, 1990) y el *Phanerochaete flavido-alba* (Pérez *et al*, 1996).

El estudio de los diferentes factores que influyen a la producción de la LiP, la MnP y la lacasa, ha mostrado que las enzimas LiP y MnP son reguladas por carbono y nitrógeno. En ausencia de estos dos elementos, el *Phanerochaete chrysosporium* pasa a una fase de metabolismo secundario donde se producen las enzimas ligninolíticas (Paszczynski *et al*, 1986; Gold *et al*, 1989; ACS Symposium. Chapter 14,15,16,20, 1990; Pease *et al*, 1992; Orth *et al*, 1995). El nitrógeno tiene un fuerte efecto regulador sobre la maquinaria ligninolítica. En cultivos con alto contenido de nitrógeno, se ha encontrado la lacasa a partir del *Phanerochaete chrysosporium* (Thurston, 1994; Mester *et al*, 1995; Moilanen *et al*, 1996). Un alto contenido de nitrógeno también favorece la aparición de proteasas extracelulares (Eriksson *et al*, 1982; Kirk *et al*, 1986; Dosoretz *et al*, 1990; Feijoo *et al*, 1995; Penninckx *et al*, 1996), las cuales inactivan a las peroxidases y por tanto un aumento en nitrógeno reprime a la LiP y a la MnP (Kirk *et al*, 1986; Dosoretz *et al*, 1990; Penninckx *et al*, 1996).

Otro factor importante que regula la expresión de la LiP y la MnP en los hongos de la pudrición blanca es el Mn⁺² (Alic *et al*, 1995). Se ha demostrado que su presencia es necesaria para la obtención de la proteína MnP (Bonnarme *et al*, 1990), pero en exceso inhibe la LiP (Brown *et al*, 1990). El Mn⁺² adicionado a los medios donde se producen las enzimas peroxidases actúa a nivel de transcripción genética; además afecta los perfiles de las isoenzimas producidas. El Mn⁺² también está involucrado en la síntesis de la lacasa de diferentes microorganismos ligninolíticos (Pérez *et al*, 1990; Thurston, 1994; Srinivasan, 1995; Moilanen *et al*, 1996; Dittmer *et al*, 1997). Otros hongos pudridores de la madera son afectados de manera similar a la observada con el *Phanerochaete chrysosporium*, indicando que la regulación por el Mn⁺² no es idiosincrática. Estudios hechos sobre organismos como *Lentinula edodes* - donde la LiP no se había detectado - produjo una buena cantidad cuando se adicionó 0.35 ppm de Mn⁺². En la *Plebia brevispora* también se ha reportado que altos niveles de Mn⁺² (39.8 ppm), inducen la producción de lacasa (Pérez *et al*, 1990). Cuando se quiere producir la LiP como única enzima, se usan niveles bajos de Mn⁺² (0.3 a 1.6 ppm) (Gold *et al*, 1989; Orth *et al*, 1995). La MnP es formada casi exclusivamente cuando el Mn⁺² es alto (40 a 190 ppm) (Gold *et al*, 1988; Orth *et al*, 1995) y la producción de ambas enzimas se da con un nivel intermedio (aproximadamente 11 ppm) (Paszczynski *et al* 1986; ACS Symposium, 1990; Gold *et al*, 1993).

Ajustando los niveles de Mn⁺² puede ser posible maximizar la producción de estas enzimas. El manganeso se encuentra en todos los tejidos de la madera y juega un rol importante en la degradación de la lignina por los hongos ligninolíticos. Grandes depósitos de MnO₂, los cuales se reconocen como manchas oscuras, se han encontrado en las paredes celulares de las maderas después de la colonización fúngica (Blanchette, 1984).

El efecto del manganeso en la regulación de la expresión de estas enzimas es una variable de gran importancia a estudiar. Otros factores que inciden en la producción de estas enzimas son la temperatura, el pH, la agitación (Tien *et al*, 1983; Paszczynski *et al*, 1986; Bumpus *et al*, 1987; Jeffries *et al*, 1987; Orth *et al*, 1995; Morohoshi, 1990; ACS Symposium, 1990; Pease *et al*, 1992), cantidad de inóculo y forma en que crece el micelio (Jiménez *et al*, 1997); la concentración de trazas minerales, específicamente el manganeso (Brown *et al*, 1990; Bonnarme *et al*, 1990; Pease *et al*, 1992), así como la adición de determinados metabolitos específicos como el alcohol veratrílico, o el tween 80 (Paszczynski *et al*,

1986; Orth *et al*, 1995; ACS Symposium, 1990; Moilanen *et al*, 1996).

La utilización del *Phanerochaete chrysosporium* en bioremediación y aplicaciones biotecnológicas requiere el control específico de cada uno de las variables del sistema degradativo de éste hongo para maximizar su expresión enzimática (Gary *et al*, 1983; Valli *et al*, 1990; Boyle *et al*, 1992; Thompson *et al*, 1998).

En éste trabajo se encontró actividad de la LiP, la MnP y la lacasa, las tres enzimas ligninolíticas mas importantes, con la cepa de *Phanerochaete chrysosporium*, en cultivos sumergidos con carbono y nitrógeno limitado y la adición de 40 ppm de Mn^{+2} .

Materiales y métodos

Microorganismo y condiciones del cultivo para replicarlo. Se utilizó la cepa *Phanerochaete chrysosporium* BKM-F-1767 (ATCC 24725) replicada en medio YMPG, el cual contiene: extracto de levadura al 1%, extracto de malta al 1%, peptona bacteriológica al 0.2%, glucosa al 1%, asparagina al 0.1%, KH_2PO_4 al 0.2%, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ al 0.1%; tiamina clorhidrato 1 mg % y agar al 2%. Se esterilizó y se colocó en cajas de Petri estériles; la cepa se replicó sobre este medio e incubó a 37°C por 5 días y se mantuvo a 4°C (Tien *et al*, 1983; Glenn *et al*, 1983).

Medio de cultivo o fluido de expresión enzimática. El fluido donde se van a producir las enzimas contiene: glucosa al 1%, tartrato de amonio al 0.02%, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ al 0.05 %; $CaCl_2 \cdot 12H_2O$ al 0.01%; Tween 80 al 0.05%; tiamina clorhidrato 0.1 mg %; alcohol veratrílico 2,5 mM; solución de elementos traza 70 ml/L (la cual contiene por litro: ácido nitriloacético 1,5 g; $MgSO_4 \cdot 5H_2O$ 3 g; NaCl 1 g; $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 0,1 g; $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 0,1 g; $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 0,1 g; $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 0,01 g; $ALK(SO_4) \cdot 12H_2O$ 0,01 g; HBO_3 0,01 g; $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$ 0,01 g.). (Penninckxs *et al*, 1996). Se llevó a pH 4.5 con buffer de tartrato de sodio.

En erlenmeyers de 500 ml se adicionaron 70 ml de fluido de expresión, se taparon con torunda de algodón y se esterizaron a 121°C por 15 minutos. Se les adicionó una suspensión estéril de esporas de la cepa recién replicada (tres semanas de replicada como máximo) en tween 80 al 0,1%, hasta una concentración final entre (10×10^4) y (18×10^4) esporas por ml. (Jiménez *et al*, 1997). Se colocaron en un agitador orbital a 150 rpm a temperatura ambiente (entre 25 y 28°C). Pasadas 48 horas, se les adicionó manganeso (como se describe a continuación) y nuevamente se dejaron bajo esas condiciones durante el desarrollo del experimento.

Efecto del Mn^{+2} sobre la producción enzimática. Se estudió el efecto de una baja y una alta concentración del manganeso, de acuerdo al efecto en diferentes microorganismos reportado en la literatura citada (Gold *et al*, 1989; Pérez *et al*, 1990; Bonnarme *et al*, 1990; Orth *et al*, 1995). Se realizaron tres repeticiones por cada concentración de manganeso. A tres de los erlenmeyers se les adicionó 1.25 ppm de Mn^{+2} y se marcaron con A (baja concentración); a los tres marcados con B se les adicionó 40 ppm de Mn^{+2} (alta concentración) y los marcados con C, 0 ppm de Mn^{+2} (control).

Actividad de la LiP, MnP y lacasa. De los diferentes medios de cultivo ensayados se tomaron muestras de 2 ml de cada fluido extracelular, se filtraron a través de membranas de 0.45 mm y se les determinó la actividad de las diferentes enzimas.

La actividad de la LiP se determinó como lo describen Kirk *et al*, (1986). Se mezclan entre 200 y 500µl del fluido extracelular en una cubeta de cuarzo de 1 ml, se adicionan entre 200 y 700 ul de buffer de tartrato de sodio 0.3 mM, de pH=3 necesarios para completar 900 µl, dependiendo de la cantidad usada de fluido; se adicionan 50 µl de alcohol veratrílico 10 mM y se inicia la reacción con la adición de 50 µl de H_2O_2 (50 µl/50 ml recién preparado), monitoreando el cambio en la absorbancia a 310 nm. La cantidad de LiP requerida para oxidar 1 mmol de alcohol veratrílico por minuto, se define como una unidad. El coeficiente de absortividad molar $\epsilon = 9.300 M^{-1} cm^{-1}$.

La actividad de la MnP se determinó como se describe por Paszcynski *et al*, (1986). Se mezclan entre 300 y 400 µl del fluido extracelular con una cantidad de buffer de tartrato de sodio 0.1 mM, pH=5, necesarios para obtener 800 µl en total; se adicionan 75 µl de vanililacetona 1 mM, 75 µl de solución de $MnSO_4$ 1 mM y se inicia la reacción adicionando 50 µl de H_2O_2 (50 µl/50 ml recién preparado), monitoreando el cambio en la absorbancia a 334 nm. Una unidad de MnP se define como la cantidad de enzima requerida para oxidar 1 µmol de Mn^{+2} a Mn^{+3} en un minuto. El coeficiente de absortividad molar $\epsilon = 18.300 M^{-1} cm^{-1}$.

La actividad de la lacasa se realizó según lo descrito por Borbonnais *et al*, (1995) preincubando 250 ml de fluido con 100 U (100ml) de Fermcolase Genecor^R por 5 minutos (Boyle *et al*, 1992), con 50 ml de 2,2'-azino-bis-(3-etiltiazolina-6-sulfonato) (ABTS) 0.5 mM como sustrato y 600 ml de solución reguladora de acetato de sodio 50 mM, pH 5.0, monitoreando el incremento de absorbancia a 420 nm. La actividad en unidades se

calculó asumiendo 1 U como la cantidad de enzima que cataliza la oxidación de 1 mmol de ABTS por minuto. El coeficiente de absortividad molar $\epsilon = 36.000 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$.

La actividad de la LiP, la MnP y la lacasa se expresan en unidades por litro (U/L).

Previamente a la determinación de la actividad de las enzimas lignolíticas se descartó la presencia de la enzima aril-alcohol oxidasa, la cual puede ocasionar reacciones de inhibición enzimática. Para tal efecto, se monitorea la absorbancia a 310 nm a una mezcla de 300 ml de fluido extracelular, 50 ml de alcohol veratrflico 10 mM, 600 ml de buffer acetato de sodio pH 5.0, sin adición de H_2O_2 durante 60 segundos. Su ausencia es confirmada si la absorbancia permanece constante. (Rodríguez *et al*, 1996).

Para confirmar la presencia de la lacasa, se determinó su efecto oxidante sobre el alcohol veratrflico mediado por el ABTS, monitoreando el aumento de la absorbancia a 310 nm en otra alícuota de la mezcla anterior adicionando además 50 ml de ABTS 0.5 mM.

Espectros UV-VIS. Utilizando un espectrofotómetro UV-VIS Beckman DU-6, se determinó este espectro a:

- A 400 ml de cada uno de los fluidos A y C, el día de máxima actividad de la LiP (día 8) diluidos a 1 ml con solución buffer de tartrato de sodio pH 3.0 usando esta misma solución buffer como blanco (Paszczynski *et al*, 1986).
- A alícuotas de cada una de los fluidos: A, B y C a los 13 días.
- A 400 ml del fluido B, los días de mínima y máxima actividad de la lacasa (días 8 y 12) diluidos a 1 ml con solución buffer de tartrato de sodio pH 3.0 usando esta misma solución buffer como blanco (Paszczynski *et al*, 1986).

Gel para determinar el peso molecular de la proteína lacasa: El día 13, día de máxima actividad de la lacasa, todo el contenido de uno de los erlenmeyer con el fluido B previamente filtrado por membranas de 0.45 mm, se liofilizó, se redisolvió en 10 ml de buffer de tartrato de sodio pH 3.0 y se cargó sobre geles de poli(acrilamida)-dodecilsulfato sódico (SDS-PAGE). Las bandas fueron reveladas con azul de coomassie.

Reactivos Químicos. La peptona microbiológica usada es marca Oxoid Ltda; el ABTS es marca Sigma; todos los demás reactivos son grado reactivo disponibles por diferentes casas comerciales.

Resultados

No se detectó presencia de la enzima aril-alcohol oxidasa en ningún cultivo.

Los resultados de las actividades en U/L de la LiP, MnP y lacasa, se presentan en la figura 1.

En los experimentos donde se usaron cultivos sin Mn^{+2} con 1.25 ppm sólo se detectó la LiP, la cual presentó su máxima actividad el día 8 (29.2 y 61.1 U/L respectivamente).

En los cultivos con una mayor cantidad de Mn^{+2} - 40 ppm - la LiP se presentó solo el día 9 y su actividad se redujo a 11.2 U/L (Figura 1), lo cual se debe a una represión causada por el Mn^{+2} , como lo han reportado algunos autores (Paszczynski *et al* 1986; Gold *et al* 1988; ACS Symposium, 1990; Bonnarme *et al* 1990; Brown *et al* 1990; Pease *et al* 1992; Gold *et al*, 1993; Moilanen *et al* 1996). En estos cultivos (con 40 ppm de Mn^{+2}), la MnP se manifestó entre los días 6 y 12 con máxima actividad el día 10 (99.1 U/L). La lacasa empezó a mostrar actividad desde el día 9, la cual fue aumentando hasta alcanzar su máximo valor el día 13 (71 U/L), cuando la MnP decayó a cero.

En la figura 2 se observan, los espectros de absorción de los cultivos con 0 y 1.25 ppm de Mn^{+2} (cultivos donde sólo se detectó la LiP), el día de su máxima actividad (día 8) a pH 3.0 (pH óptimo para la actividad de ésta enzima). Ambos cultivos muestran el máximo de absorbancia a 407 nm, longitud de onda a la cual la absorción de éste grupo hemo ha sido reportada (Paszczynski *et al*, 1986; ACS Symposium, 1990), lo que corrobora la presencia de la LiP no complejada.

Los espectros de absorción a los 13 días (día de máxima actividad de la lacasa), de los fluidos A (1.25 Mn^{+2}), B (40 ppm Mn^{+2}) y C (0 ppm Mn^{+2}) se muestran en la figura 3. En ellos se observa:

- Cultivo sin Mn^{+2} : No presenta absorción a 407 nm, lo cual corrobora la ausencia de la LiP en este fluido el día 13, como se observa en la figura 1.
- Cultivo con 1.25 ppm de Mn^{+2} : La absorción a 407 nm corrobora que todavía subsiste la actividad de la LiP el día 13.
- Cultivo con 40 ppm de Mn^{+2} : Presenta una banda de absorción ancha entre 390 y 460 nm. (Espectro B de Figura 3) y también presenta una pequeña banda a 600 nm, la cual indica la presencia de la lacasa, cuyo espectro UV ha sido reportado pre-

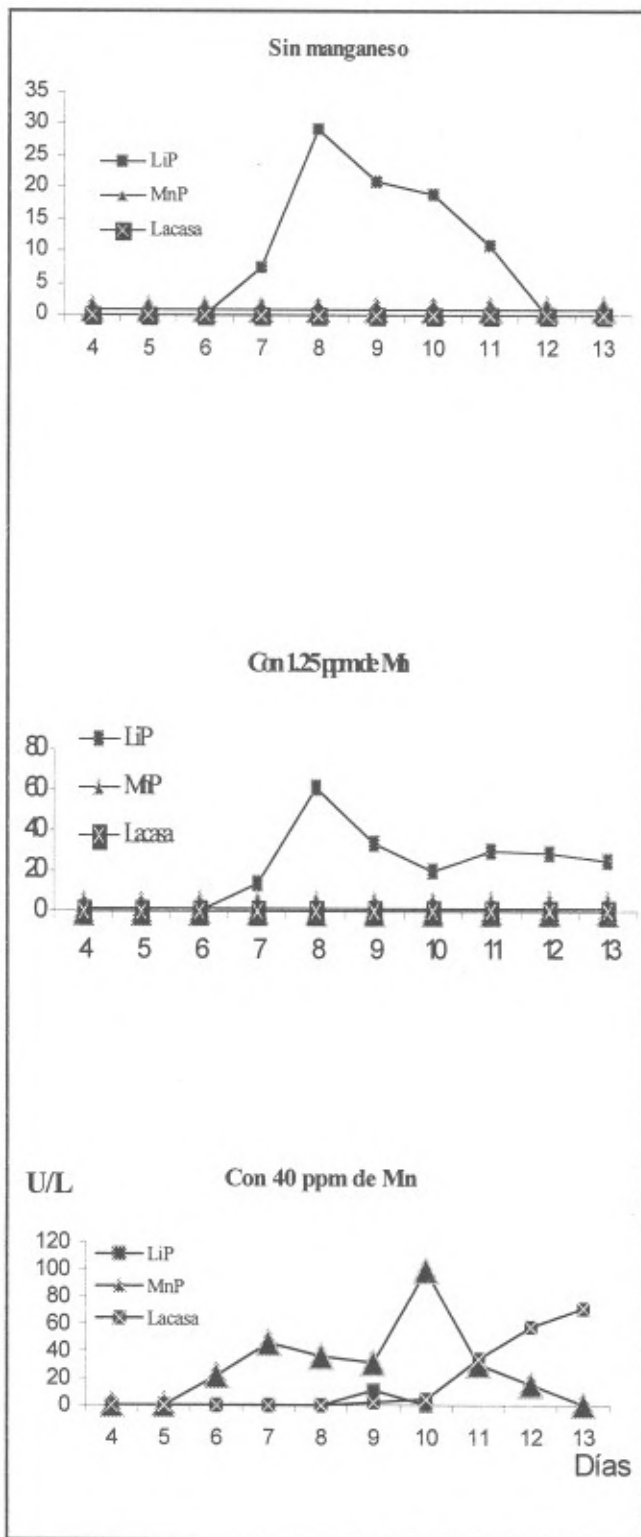


Figura 1. Actividad de las enzimas LiP, MnP y lacasa, en cultivos sumergidos de *Phanerochaete chrysosporium*, con diferentes cantidades de manganeso.

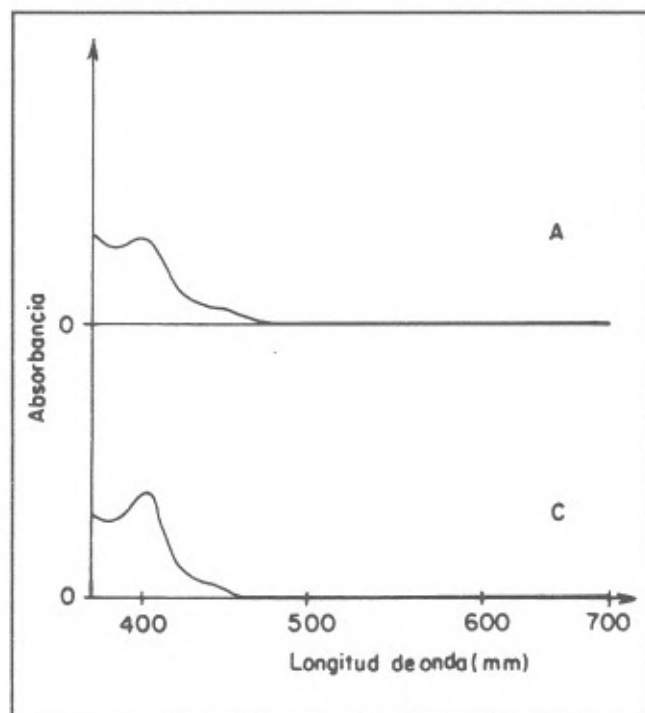


Figura 2. Espectros de absorción de los cultivos con bajo contenido de Mn^{2+} . A (1.25 ppm) y C (0 ppm) a los 8 días (día de máxima actividad de la LiP), con solución buffer de tartrato de sodio pH=3.0 como blanco

viamente (Morohoshi, 1990; Thurston, 1994; Pérez *et al*, 1996).

La presencia de lacasa se confirmó comparando el espectro de los cultivos con 40 ppm del día 8 (B_I) y del día 12 (B_{II}), donde hay ausencia y presencia de la lacasa respectivamente (Figura 4) por la aparición de la pequeña banda a 600 nm en el fluido B_{II} . La banda de absorción ancha entre 390 y 460 nm., que se presenta en éstos cultivos, puede ser atribuible a los diferentes estados de oxidación de las enzimas complejadas con Mn^{2+} o Mn^{3+} o con H_2O_2 . (Paszczynski *et al*, 1986; Gold *et al* 1988; ACS Symposium, 1990; Gold *et al*, 1993; Pérez *et al*, 1996) (tanto el día 8 como el día 12, se detectó actividad de la MnP y la lacasa). Aunque el día 13 no se detectó actividad de la MnP en el cultivo con 40 ppm de Mn^{2+} , la banda ancha sigue apareciendo, lo cual indica que puede estar aún presente pero de forma inactiva.

La presencia de la lacasa en los cultivos con 40 ppm de Mn^{2+} también se confirma al monitorear el cambio en la absorbancia a 310 nm producida por la reacción del alcohol veratrílico y la lacasa inducida por ABTS. Este

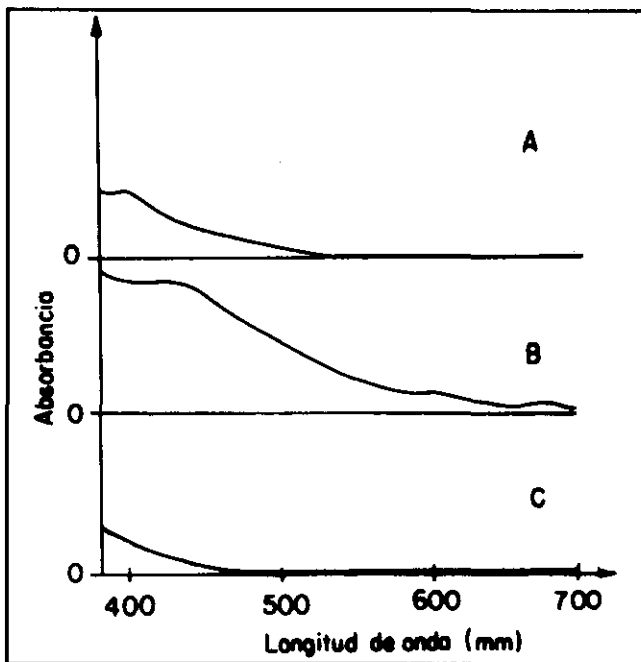


Figura 3. Espectros de absorción de los cultivos con diferentes cantidades de Mn^{2+} . A (1.25 ppm); B (40 ppm) y C (0 ppm), a los 13 días (día de máxima actividad de la lacasa), con agua como blanco

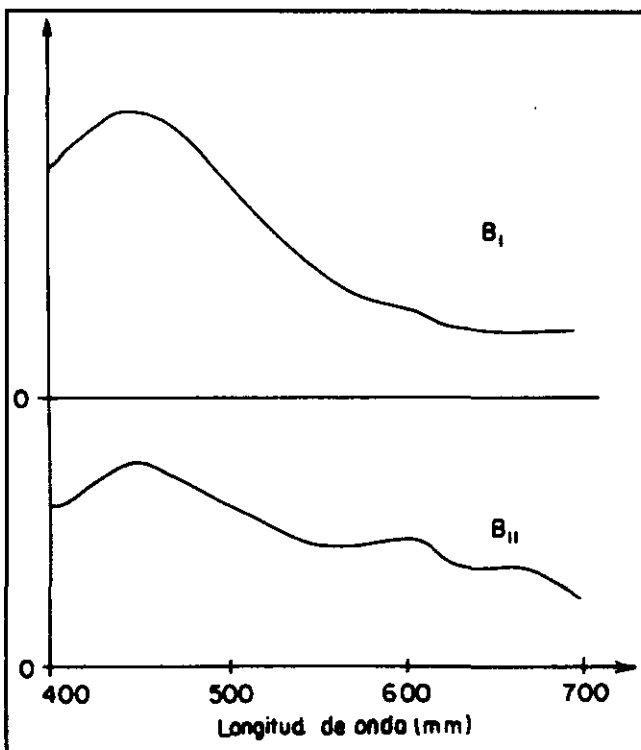


Figura 4. Espectros de absorción de cultivo con alto contenido Mn^{2+} . Fluído B (40 ppm de Mn^{2+}) el día 8 (B_I) y el día 12 (B_{II}) con solución buffer de tartrato de sodio pH 3.0 como blanco

último actúa como un mediador de la actividad de la lacasa, para oxidar compuestos no fenólicos tales como el alcohol veratrílico (Bourbonnais *et al*, 1995; Eggert *et al*, 1996; Collins *et al*, 1998). El aumento en la absorbancia a 310 nm. esta indicando la formación del aldehído veratrílico, corroborando la oxidación del alcohol veratrílico por acción de la lacasa inducida por el ABTS. (Eggert, *et al*, 1996; Collins *et al*, 1998).

El resultado de los geles SDS-PAGE del fluído B a los 13 días, (no se muestra) presentó una sola banda, correspondiente a una proteína de peso molecular aproximado de 46 KD, la cual no puede ser ni LiP, ni MnP, puesto que ese día no se detectó actividad de estas enzimas, pero puede ser atribuida a la lacasa, dado que del *Phanerochaete chrysosporium*, se ha obtenido una lacasa con peso molecular 46.5 KD usando celulosa como fuente de carbono (Srinivisan, 1995).

Discusión

La producción de estas tres enzimas, bajo las condiciones descritas en este estudio, no ha sido reportada. Aunque la producción enzimática obtenida no es alta, la presencia de las tres enzimas en un mismo cultivo es muy interesante de resaltar, porque amplía las opciones que tiene este hongo y su maquinaria enzimática en bioremediación, dado que las enzimas podrían actuar secuencialmente sobre un sustrato dado.

Como se anotó anteriormente son varios los factores que afectan la presencia y o ausencia de la actividad de estas enzimas. La presencia de ellas en el mismo cultivo se puede atribuir a cambios en la relación nitrógeno/manganeso, ya que estos dos nutrientes afectan notablemente la actividad de las enzimas ligninolíticas. Una relación óptima entre estos dos elementos favorece su presencia y puede haberse logrado, por la peptona hidrolizada utilizada en éste estudio, dado que la peptona produce algunos péptidos tales como glicina, cisteína y glutamato, los cuales son poderosos agentes quelantes de metales, entre ellos el manganeso (Eggert *et al*, 1996). Por tanto, en los cultivos con manganeso, parte del manganeso adicionado se compleja y no esta disponible para el microorganismo. De ahí que la inhibición de la LiP no fué total, en los cultivos con alto manganeso (40 ppm), debido a que el manganeso disponible no era tan alto para inhibirla. Pero además, el alcohol veratrílico adicionado inicialmente a los fluídos, pudo jugar un rol protector de esta enzima (Mester *et al*, 1995; Valli *et al*, 1990). El alcohol veratrílico previene de la inactivación que puede causarle el H_2O_2 presente en el cultivo, el cual es producido por la oxidación de la glucosa por la glyoxal oxidasa

(Kersten, 1990; Kurek *et al*, 1995). Se conoce además que el *Phanerochaete chrysosporium* sintetiza alcohol veratrílico por la vía metabólica del ácido shikímico, aunque su producción es menor en cultivos con alto contenido de manganeso (Jensen *et al*, 1994, Dittmer *et al*, 1997).

En cuanto al nitrógeno, en la peptona hidrolizada está más disponible y por tanto su efecto puede ser similar al que se da cuando el medio tiene suficiente nitrógeno, causando disminución de la actividad de las enzimas LiP y MnP, las cuales se encontraron con muy baja actividad y a su vez esa mayor disponibilidad del nitrógeno favoreció la presencia de la lacasa.

Referencias

- ACS Symposium. Series 460. 1990 "Enzymes in biomass conversion". Ed. Gary F. Leathan. Chapter 14,15,16,20. Pag 181-223.
- Alic Li D., Brown M. J. A. & Gold, M. H. 1995. "Regulation of Manganese Peroxidase Gene transcription by hydrogen peroxide, chemical stress and molecular oxygen". Appl. Environm. Microb. **61**: 341-345.
- Blanchette R.A. 1984 "Manganese in wood decayed by white rot fungi". Phytopathology, **74**: 725-730.
- Bonnarme P. & Jeffries T.W. 1990. "Mn(II) regulation of lignin peroxidases and manganese-dependent peroxidases from lignin-degrading white rot fungi". Appl. Environm. Microb. **56**: 210-217.
- Bourbonnais R. & Paice M.G. 1990. "Oxidation of non-phenolic substrates. An expanded role for laccase in lignin biodegradation". FEBS Lett. **267**: 99-102.
- _____, Reid I. D., Lanthier P. & Yaguchi M. 1995 "Lignin oxidation by laccase isoenzymes from *Trametes versicolor* and role of the mediator 2,2'-Azinobis (3-Ethylbenzthiazoline-6-sulfonate) in kraft lignin depolymerization" Appl. Environm. Microb., **61** (5): 1876-1880.
- Boyle C.D., Kropp B. R., & Reid I.D. 1992. "Solubilization and mineralization of lignin by white rot fungus" Appl. Environm. Microb. **58** (10): 3217-3224.
- Brown J. A.; Glenn J. K. & Gold M. H. 1990. "Manganese regulates the expression of manganese peroxidase by *Phanerochaete chrysosporium*" J. Bacter. **172**: 3125-3130.
- Bumpus J. A. & Aust S. D. 1987. "Biodegradation of environmental pollutants by the white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium* involvement of the lignin-degrading system". Bioessays **6**: 166-170.
- Collins P., Bobson A.D. & Field J. 1998. "Reduction of 2,2'-Azinobis (3-ethylbenzthiazoline-6-sulfonate) cation radical by physiological organic acid in the absence and presence of manganese", Appl. Environm. Microb. **64** (6): 2026-2031.
- Dittmer J. K., Patel N. J., Dhawale S. W. & Dhawale S. S. 1997) "Production of multiple laccase isoforms by *Phanerochaete chrysosporium* grown under nutrient sufficiency" FEMS Microb., **149**: 65-70.
- Dosoretz C.G., Chen H-C & Grethlein H.E. 1990. "Effect of environmental conditions on extracellular protease activity in lignolytic cultures of *Phanerochaete chrysosporium*", Appl. Environm. Microb., **56** (2): 395-400.
- Eggert C., Temp U., Jeffrey F.D. & Eriksson K-E. L. 1996 "A fungal metabolite mediates degradation of non-phenolic lignin structures and synthetic lignin by laccase". FEBS Letters **391**: 144-148.
- Eriksson K.E. & Pettersson B. 1982. "Purification and partial characterization of two acidic proteases from the white rot fungus *Sporotrichum pulvurulentum*" Eur. J. Biochem., **124**: 635-642.
- Feljoo A.V., Rothschild G., Dosoretz N. & Lema J.M. 1995."Effect of addition of extracellular culture fluid on lignolytic enzyme formation in *Phanerochaete chrysosporium*" J. Biotech., **40** (1): 21-29.
- Gary F. L., Crawford R. L. & Kirk T. K. 1983. "Degradation of Phenolic compounds and ring cleavage of catechol by *Phanerochaete chrysosporium*" Appl. Environm. Microb. **46** (1): 191-197.
- Glenn J. K.; Morgan M. A.; Mayfield M.B.; Kuwahara M. & Gold M. H. 1983. "An extracellular H₂O₂-requiring enzyme preparation involved in lignin biodegradation by the white rot basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium*". Biochem. Biophys. **114**: 1077-1083.
- Gold M. H. & Glenn J. K. 1988. "Manganese Peroxidase from *Phanerochaete chrysosporium*". Methods in Enzymology, **161**: 258-264.
- _____; Wariishi H. & Valli K. 1989. "Extracellular peroxidases involved in lignin degradation by the white rot basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium*". ACS Symposium, **389**: 127-140.
- _____ & Alic M. 1993. "Molecular biology of the lignin-degradin basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium*". Microb. Reviews **57** (3): 605-622.
- Jeffries T. W.; Choi S. & Kirk T. K. 1987. "Nutritional regulation of lignin degradation by *Phanerochaete chrysosporium*". Appl. Environm. Microb. **42**: 290-296.
- Jensen K. A., Jr, Evans M.C., Kirk T.K. & Hammel K.E. 1994) "Biosynthetic pathway for veratryl alcohol in lignolytic fungus *Phanerochaete chrysosporium*" Appl. and Environm. Microb. **60**: 709-714.
- Jiménez G.A., Penninckx M.J. & Lejeune R. 1997. "The relationship between pellet size and production of Mn(II) peroxidase by *Phanerochaete chrysosporium* in submerged culture". Enzyme and Microb. Technol. **21**: 537-542.
- Kersten P. J. 1990. "Glyoxal oxidase of *Phanerochaete chrysosporium*: Its characterization and activation by lignin peroxidase". Proc. Natl. Acad. Sci. USA., **87**: 2936-2940.
- Kirk T. K.; Tien M.; Kersten P. J.; Mozuch M. D. & Kalyanaraman B. 1986. "Ligninase of *Phanerochaete chrysosporium*. Mechanism of its degradation of the non-phenolic arylglycerol B-aryl ether substructure of lignin". Biochem J. **236**: 279-287.
- Kurek B., & Kersten P. J. 1995. "Physiological regulation of glyoxal oxidase from *Phanerochaete chrysosporium* by peroxidase systems". Enzyme and Microbial Technology, **17**: 751-756.
- Kuwahara M.; Glenn J. K.; Morgan M. A. & Gold M. H. 1984. "Separation and characterization of two extracellular H₂O₂

- dependent oxidases from lignolytic cultures of *Phanerochaete chrysosporium*". FEBS Lett., 169: 247-250.
- Mester T., De Jong E. & Field J.A. 1995. "Manganese regulation of veratryl alcohol in white rot fungus and its indirect effect on lignin peroxidase" Appl. and Environm. Microb. 61 (5): 1881-1887.
- Moilanen A.M., Lundell T., Vares T. & Hatakka A. 1996 "Manganese and malonate are individuals regulators for the production of lignin and manganese peroxidase isoenzymes and in the degradation of lignin by *Phlebia radiata*". Appl Microb. Biotechnol., 45: 792-799.
- Morohoshi N. ACS Symposium. Series 460. 1990 "Enzymes in biomass conversion". Ed. Gary F. Leathan. Chapter 17: 207-223.
- Orth A. B. & Tien M. 1995 "Biotechnology of lignin degradation. In Ulrich Kuck (Ed.), The Mycota. A comprehensive treatise on fungi as experimental system for basic and applied research. Genetics and Biotechnology II. K. Esser and P. A. Lemke, 287-302.
- Paszczynski, A. ; Huynh V. B. & Crawford R. 1986. "Comparison of ligninase-1 and peroxidase M-2 from the white-rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*". Arch. Biochem. Biophys. 244: 750-765.
- Pease E. A. & Tien M. 1992. "Heterogeneity and regulation of manganese peroxidases from *Phanerochaete chrysosporium*". J. Bacter. 174: 3532-3540.
- Penninckx M. & Jiménez G.A. 1996 "Transformación Microbiológica de la Biomasa, Curso teórico-práctico". Université Libre de Bruxelles and Universidad de Antioquia. Medellín, Abril 22-27.
- Perez J. & Jeffries TW. 1990. "Mineralization of ¹⁴C ring-labeled synthetic lignin correlates with the production of lignin peroxidase, not of manganese peroxidase or laccase" Appl. Environm. Microb. 56: 1806-1812.
- , Martínez J. & De la Rubia T. 1996 "Purification and partial characterization of a laccase from the white rot fungus *Phanerochaete flavido-alba*", Appl. Environm. Microb. 62(11): 4263-4267.
- Rodríguez A. , Falcón M. A., Carnicero A., Perestelo F., De la Fuente G. & Trojanowski J. 1996. "Laccase activities of *Penicillium chrysogenum* in relation to lignin degradation" Appl. Microb. Biotech. 45: 399-403.
- Srinivasan, P. 1995 "Production the lacasse of *Phanerochaete chrysosporium*" Appl. and Environ. Microb, 60(2): 349-356.
- Tien M. & Kirk T. K. 1983. "Lignin-degrading enzyme from the hymenomycete *Phanerochaete chrysosporium* burds". Science. 221: 661-663.
- Thurston, F. Christopher. 1994. "The structure and function of fungal laccases". Microb. 140: 19-26.
- Thompson D. N., Hames B. R., Reddy C. A. & Grethlein H.E. 1998. "In vitro degradation of natural insoluble lignin in aqueous media by the extracellular peroxidases of *Phanerochaete chrysosporium*" Biotech. And Bioeng. 57 (6): 704-717.
- Valli K., Waritshi H. & Gold M. H. 1990. "Oxidation of monomethoxylated aromatic compounds by lignin peroxidase: role of veratryl alcohol in lignin biodegradation", Biochemistry, 29: 8535-8539.

ESTUDIO DE LA REACTIVIDAD DE CATIONES RADICALES α -AMONIO DISTÓNICOS EN SOLUCIÓN

por

Luz Amalia Ríos V.,^{a,b} Rodrigo Paredes & ^a William R. Dolbier, Jr.,^b

Resumen

Ríos V. L. A., R. Paredes & W. R. Dolbier, Jr.: Estudio de la reactividad de cationes radicales α -Amonio distónicos en solución. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **23**(89): 595-602, 1999. ISSN 0370-3908.

Se estudiaron las reacciones de abstracción de hidrógeno, adición bimolecular y ciclación de varios cationes radicales distónicos (**1a-11a**). Se midieron las constantes de velocidad absolutas para la ciclación de **6a** y **7a** y la constante de velocidad de abstracción de hidrógeno de **6a**. Además, se realizó un estudio de Hammett, para lo cual se desarrollaron varios experimentos de competencia de una serie de radicales *p*-sustituídos (**8a-11a**) obteniéndose los valores de las constantes de velocidad de los procesos de ciclación de cada sistema. También se presenta una posible explicación de la inesperada baja reactividad de los sistemas **1a** y **2a** hacia la adición bimolecular a olefinas, basados sobre estudios en fase gaseosa sobre la interacción *p*-catión.

Palabras clave: catión radical distónico, interacción π -catión.

Abstract

The general reactivity of several distonic radical cations (**1a-11a**) has been studied in solution. Hydrogen abstraction, bimolecular alkene addition and cyclization reactions of these radicals have been studied. Absolute rate constants for cyclization of the systems **6a** and **7a** have been measured by LFP and the rate of H-atom transfer from *n*-Bu₃SnH has been measured by a competition study of **6a**. To explore the reactive nature of these radicals Hammett and computational studies were performed. A series of *p*-substituted radicals **8a** to **11a** was involved in a competition experiment and the value for the rate constants of the cyclization process for each system was obtained. On the other hand, we present here a possible explanation of the unexpected reactivity of the systems **1a** and **2a** to undergo bimolecular addition to olefins, based on gas phase studies of cation *p*- interaction.

Key Words: distonic radical cation, cation π - interaction.

^a Departamento de Química, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

^b Department of Chemistry, University of Florida, Gainesville, FL. U.S.A.

* En el presente Directora del Departamento de Química, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

Introducción

El término catión radical "distónico" (derivado del griego *diestvs* (diestos) y del latín *distans* que significa separado) fue introducido por Yates, Bouma y Radom en 1984^{1,2} para describir una clase general de cationes radicales en los cuales la carga y el radical están sobre centros separados. En recientes estudios teóricos y experimentales,¹⁻³ se ha demostrado que esos iones muestran ser termodinámica y cinéticamente más estables que sus contrapartes convencionales. El término *ilidón* o *a-distónico* se usa para describir una subclase de cationes radicales en los cuales la carga y el radical están en centros adyacentes (ejemplo $^{\bullet}\text{CH}_2\text{O}^+\text{H}_2$). Los términos *b-* y *g-* se usan cuando uno o más átomos separan el sitio del radical del centro de la carga, respectivamente.

Los cationes radicales distónicos juegan un papel muy importante como productos e intermediarios centrales en reacciones de disociación de muchas moléculas orgánicas ionizadas. Además, ciertos aminoácidos irradiados con rayos C- o γ - producen iones en matrices congeladas.⁴ De tal manera que se cree que la investigación de iones distónicos podría llevar a un mejor entendimiento de las consecuencias biológicas de la irradiación ionizante.

Aunque los cationes radicales han sido aceptados como intermediarios estables y comunes en fase gaseosa, aún se conoce muy poco acerca de ellos. La reactividad en general de varios cationes radicales distónicos del tipo $\text{R}_m\text{X}^+\text{CH}_2^{\bullet}$ ($\text{X} = \text{N}, \text{S}, \text{o P}$) ha sido estudiada en fase gaseosa, sus investigadores consideran que tales iones "podrían ofrecer un medio para examinar la química de los radicales libres en fase gaseosa usando espectrometría de masas."⁵ De estos estudios se ha encontrado que cationes radicales distónicos tales como metilen dimetilsulfonio, $(\text{CH}_3)_2\text{S}^+\text{CH}_2^{\bullet}$, exhibe reactividad en fase gaseosa incluyendo abstracción de hidrógeno y adición de alquenos;^{6,7} dicho comportamiento es consistente con el comportamiento de un radical típico centrado en carbono.

Hasta el momento de la realización de este trabajo no se había reportado ningún estudio cinético de cationes radicales *a-amonió* distónicos en la literatura. Así que en esta investigación se llevó a cabo un estudio sistemático y cuantitativo de la reactividad de estas especies en solución.

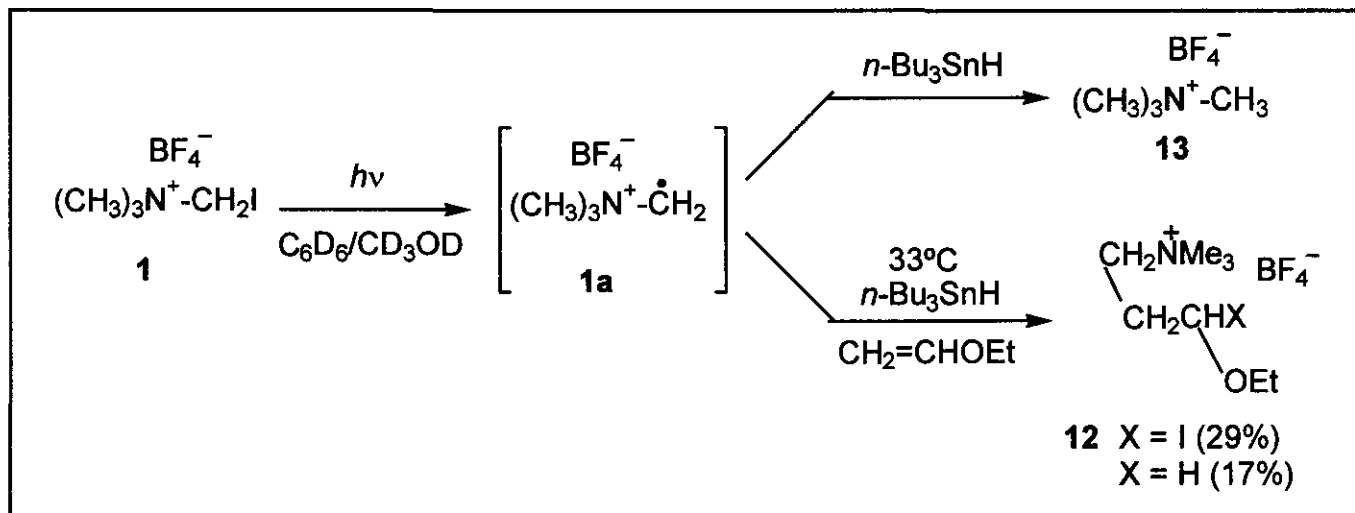
En este estudio se examinaron los sistemas radicales *a-amonió*metil coordinadamente saturados $\text{R}(\text{CH}_3)_2\text{N}^+\text{CH}_2^{\bullet}$ y $\text{R}(\text{CH}_3)(\text{H})\text{N}^+\text{CH}_2^{\bullet}$. Tales radicales se generan a partir de los precursores que poseían los grupos

yodometil y metil fenil sulfuro, por medio de rompimiento homolítico usando radiación ultravioleta de los enlaces C-I o C-SPh . Se estudiaron las reacciones de abstracción de hidrógeno, adición bimolecular a alquenos y de ciclación de dichos radicales. También se llevaron a cabo estudios de Hammett y computacionales y se consideró importante calcular la energía del orbital SOMO del radical **1a** y compararla con otros sistemas tales como radicales hidrocarbonados y fluorados. De otro lado se presenta una posible explicación de la inesperada baja reactividad de los sistemas **1a** y **2a** para sufrir adición bimolecular a olefinas, basados sobre estudios de fase gaseosa de la interacción π -catión.⁷

Resultados y Discusión

El precursor **1** se sintetizó a partir de yoduro de yodometil trimetilamonio (**20**) el cual se preparó por reacción a temperatura ambiente de la respectiva amina terciaria con un exceso de 4 veces de yoduro de metilo en acetonitrilo.^{8,9} Cuando el precursor yodometil **1** (**esquema 1**) se irradió en la presencia de hidruro de tributil estaño, se observó la conversión a **13**, lo cual es la reacción esperada para un proceso en cadena de radicales libres involucrando el radical **1a**. Cuando se hicieron ensayos para observar la adición bimolecular competitiva de **1a** a varios olefinas, incluyendo 1-hexeno, estireno, pentafluoroestireno y *a*-metilestireno, curiosamente no se observó dicha adición, llevando sólo a la formación del tetrafluoroborato de trimetilamonio (**13**); sin embargo, sí se observó su adición al etil vinil éter. También se llevaron a cabo experimentos de adición de **1a** a los estirenos mencionados arriba seguidos por fotólisis por rayo láser, sin observar adición alguna.

El radical $(\text{CH}_3)_3\text{N}^+\text{CH}_2^{\bullet}$ debe exhibir una electrofiliidad un poco mayor que el radical fluorado del tipo $\text{CF}_3(\text{CF}_2)_n\text{CH}_2^{\bullet}$ (valores de s_p de 0.82 vs. 0.52 para $(\text{CH}_3)_3\text{N}^+$ y $n\text{-C}_4\text{F}_9$, respectivamente)¹⁰ Así, debido a que en el grupo de investigación del Dr. Dolbier se obtuvo una constante de velocidad de segundo orden para la adición del radical 2,2-difluoropentil a un trio de estirenos por fotólisis por rayo láser,¹¹ la observación de la no adición del radical **1a** presumiblemente más reactivo, produjo preguntas interesantes con respecto a la posibilidad de que estuvieran interviniendo problemas estéricos en la adición bimolecular de **1a**. Para probar que eran tal vez razones estéricas las causantes de esta baja reactividad, se preparó el precursor metil-fenil-sulfuro **2** siguiendo el método señalado en la literatura¹² y éste se irradió en presencia de hidruro de tributil estaño observándose la conversión a **14**, **esquema 2**. Cuando se ensayó la reacción de adición del radical **2a**



a etil vinil éter, se observó la formación del producto de reducción (~74%) y del producto de adición (~26%), sin embargo, la adición al α -metilestireno en presencia de hidruro de tributilestano curiosamente no ocurrió y sólo conllevó a la formación de **14**.

Estos resultados no son consistentes con el comportamiento esperado para radicales electrofílicos, así que recientemente encontramos una posible explicación para ésto.⁷ Se han reportado que hay interacciones entre el NMe_4^+ con los orbitales π del anillo de benceno en estudios en fase gaseosa, con una energía de enlazamiento de 9 Kcal/mol.¹³ Esos estudios sugieren que las mismas interacciones podrían existir en solución como también en moléculas biológicas.

Con ésto en mente, puede ser posible que los cationes radicales distónicos generen algún complejo estable entre la parte del catión amonio de **1a** o **2a**, con el anillo aromático del estireno y del α -metilestireno de tal manera que la parte del radical $\cdot\text{CH}_2$ no queda con la geometría apropiada para adicionarse al alqueno terminal. Con esta hipótesis se podría explicar también, por qué la adición bimolecular competitiva de **1a** y **2a** fue efectiva con el etil-vinileter, pero no se podría explicar la no ocurrencia en el caso del 1-hexeno. Es muy importante resaltar, que todas las reacciones se llevaron a cabo en benceno y que la interacción π puede ser también con el solvente y explicarse así baja reactividad en las adiciones bimoleculares.

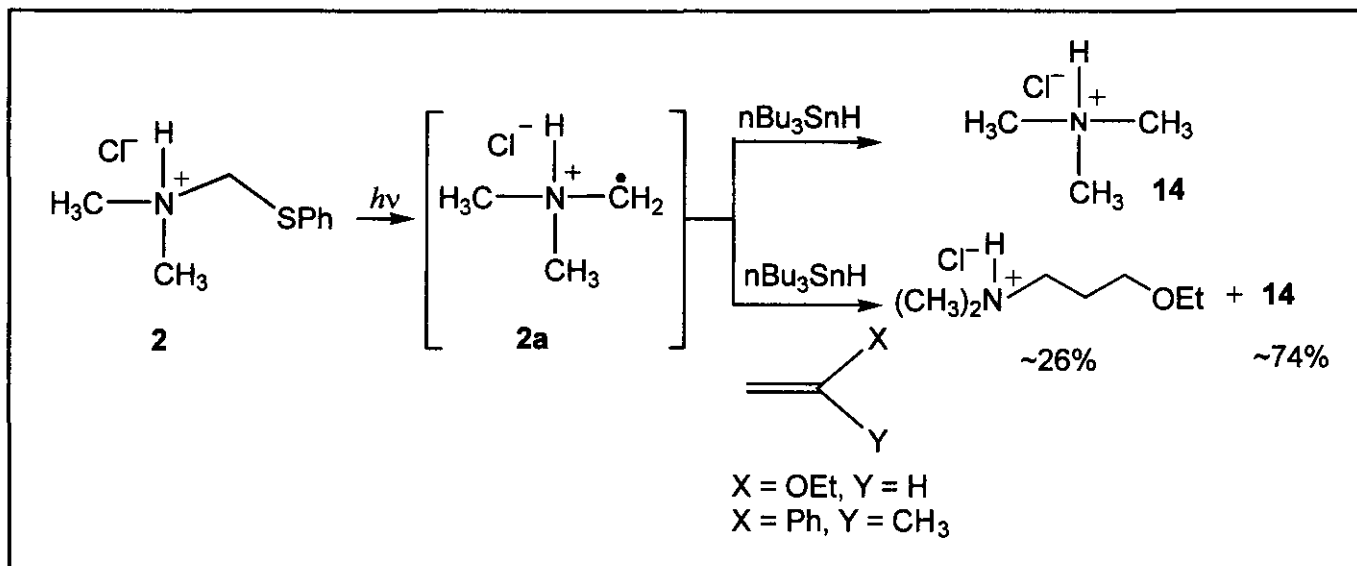
Mientras la adición intermolecular a alquenos dió un mínimo éxito, las adiciones intramoleculares a alquenos

fueron mucho más exitosas. Así, se llevaron a cabo las reacciones de ciclación *5-exo* y *6-exo* empezando obviamente con la preparación adecuada de los precursores. Cuando el sistema **3** (esquema 3) se irradió, el resultado indicó que el proceso de ciclación fue demasiado rápido de tal manera que no se pudo observar reducción competitiva aún a la máxima concentración posible de *n*-Bu₃SnH (0.18M) en 1:1 CD₃OD/C₆D₆. Este resultado, acoplado con la observación de que el radical 6-fenil sustituido **4a** sufrió ciclación demasiado rápida para que se pudiera medir en nanosegundos por fotólisis por rayo láser* (k_c ³ 10^8 s⁻¹ at 25°C), indicó que la valoración cinética de tales ciclaciones *5-exo* no podría ser posible ni por fotólisis por rayo láser ni por estudios de competencia.

Las ciclaciones *5-exo* de estos radicales pueden usarse con propósitos sintéticos, muy efectivamente, tal como lo demostró un reporte corto que apareció recientemente, respecto a la síntesis de heterocíclicos con cabeza de puente de nitrógeno, por cierre de radicales α -amoniometil tales como **3a**.¹³

Debido a que hay una disminución de aproximadamente 100 veces en la velocidad de las ciclaciones *6-exo* vs. *5-exo* de radicales, se sintetizó y se estudió el análogo 7-heptenil. Así, se generó el catión radical distónico **5a** por fotólisis a 266 nm del correspondiente yoduro **5**

* Todos los estudios de fotólisis por rayo láser fueron realizados en el "Stearie Institute for Molecular Science, National Research Council of Canadá" por los doctores: Janusz Lusztyk, K. U. Ingold y Mats Jonsson, quienes amablemente nos brindaron su colaboración con estos análisis.



Esquema 2

en metanol. El sistema de detección UV-vis controlado por computador se ha descrito previamente.¹⁴ La cinética de la reacción del cierre del anillo de **5a** se estudió a 335 nm (formación de productos) y el espectro de absorción observado se muestra en la figura 1.

La temperatura se hizo variar desde -60 a +20°C. Estos datos cinéticos se usaron para obtener los parámetros de Arrhenius dados en el **esquema 4**¹⁵. La constante de velocidad para esta ciclación fue de $3.0 (0.4) \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ a 25°C, siendo 60 veces más rápida que la del radical 7,7 difenil-6-heptenil ($5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$)¹⁶ a 25°C. La comparación

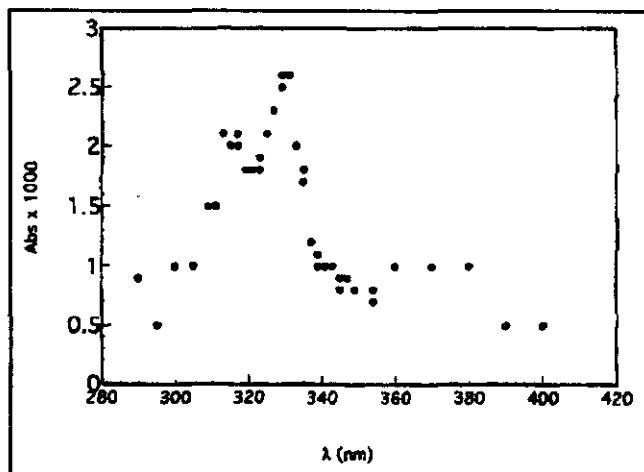


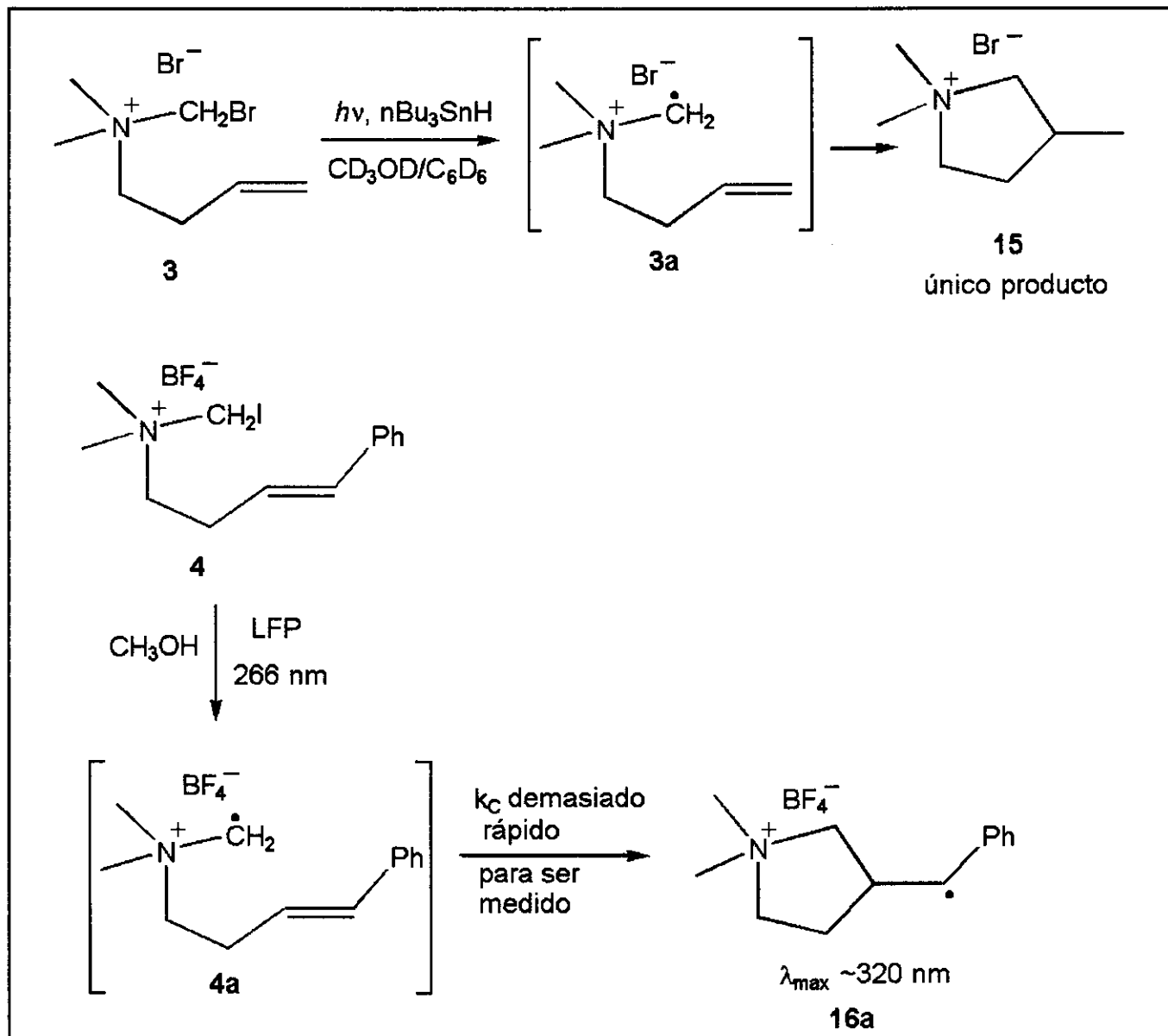
Figure 1. Espectro de absorción observado a 266 nm por fotólisis por rayo láser del compuesto **5** en una solución de metanol

de la ciclación de **5** con el radical nucleofílico N-metil-6,6-difenil-5-hexenamínol mostró que **5a** cicla ~4300 veces más rápido que el sistema aminil.¹⁷ En contraste, la ciclación del catión radical N-metil-6,6-difenil-5-hexenamínol es ~1.3 veces más rápida que la del catión radical distónico **5a**, probablemente debido a su naturaleza electrofílica.¹⁷

También se determinaron dos constantes de velocidad, usando fotólisis por rayo láser de la ciclación del derivado monofenil **6** (**esquema 4**) a 320 nm, siguiendo la formación del producto, los valores obtenidos fueron 1.7 and $0.21 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ a 25 y 61°C, respectivamente. Tal como se esperaba, la constante de velocidad de ciclación del sistema monofenil resulta ser aproximadamente la mitad de la del sistema difenil.

Usando el sistema **5a** como un radical reloj, fue posible obtener la constante de velocidad para la reacción de abstracción de hidrógeno a partir del $n\text{-Bu}_3\text{SnH}$ mediante una serie de experimentos de competencia (**esquema 5**). La constante de velocidad observada ($7.2 \times 10^6 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ a 33°C) es un poco más grande en comparación con el valor de $2.9 \times 10^6 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ para la transferencia de hidrógeno a partir de $n\text{-Bu}_3\text{SnH}$ a un radical primario alquílico¹⁸. La constante de velocidad para la abstracción de hidrógeno del sistema **5a** es ~12.2 veces más rápida que la del radical N-metil-5,5-difenil-4-hexenamínol.¹⁷

Con el valor de la constante de velocidad para la transferencia de hidrógeno disponible, se llevaron a cabo las reacciones de ciclación y de reducción competitivas entre



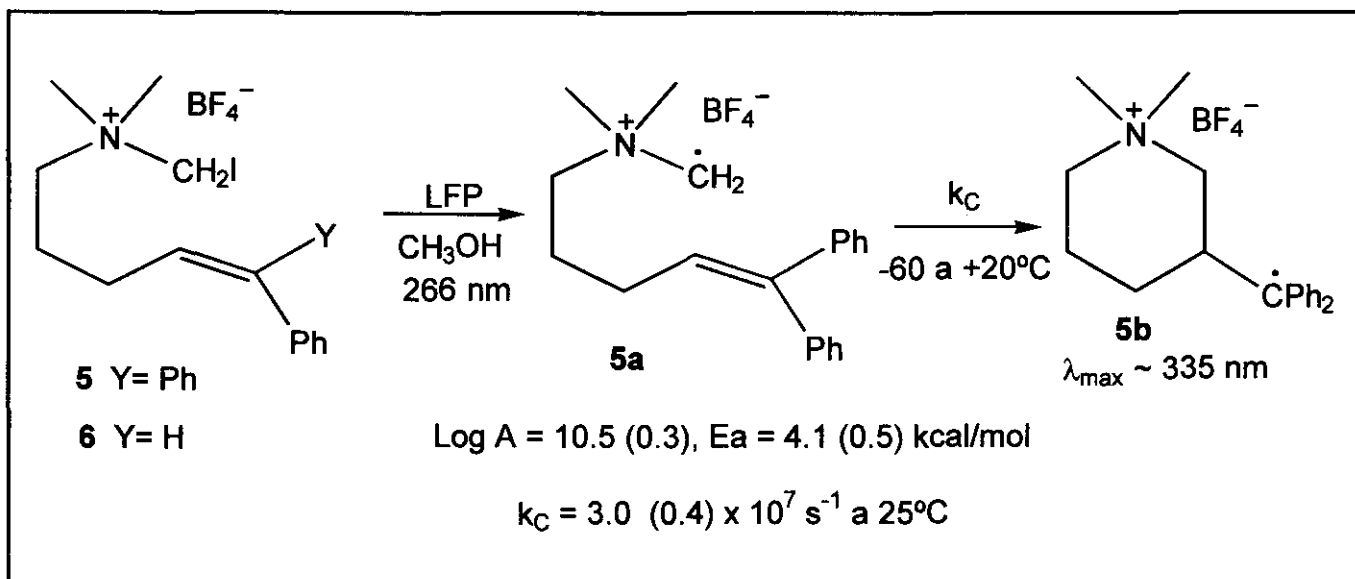
Esquema 3

sí, del sistema no sustituido 6-heptenil 7. Comparando la constante de velocidad observada ($1.5 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$) para la ciclación 6-exo de 7a con el valor de la ciclación del radical análogo 6-heptenil ($7.6 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$),¹⁹ indica un aumento significativo (~200-veces) para el sistema 7a más que el observado para el sistema 5a 7,7-difenil (60-veces).

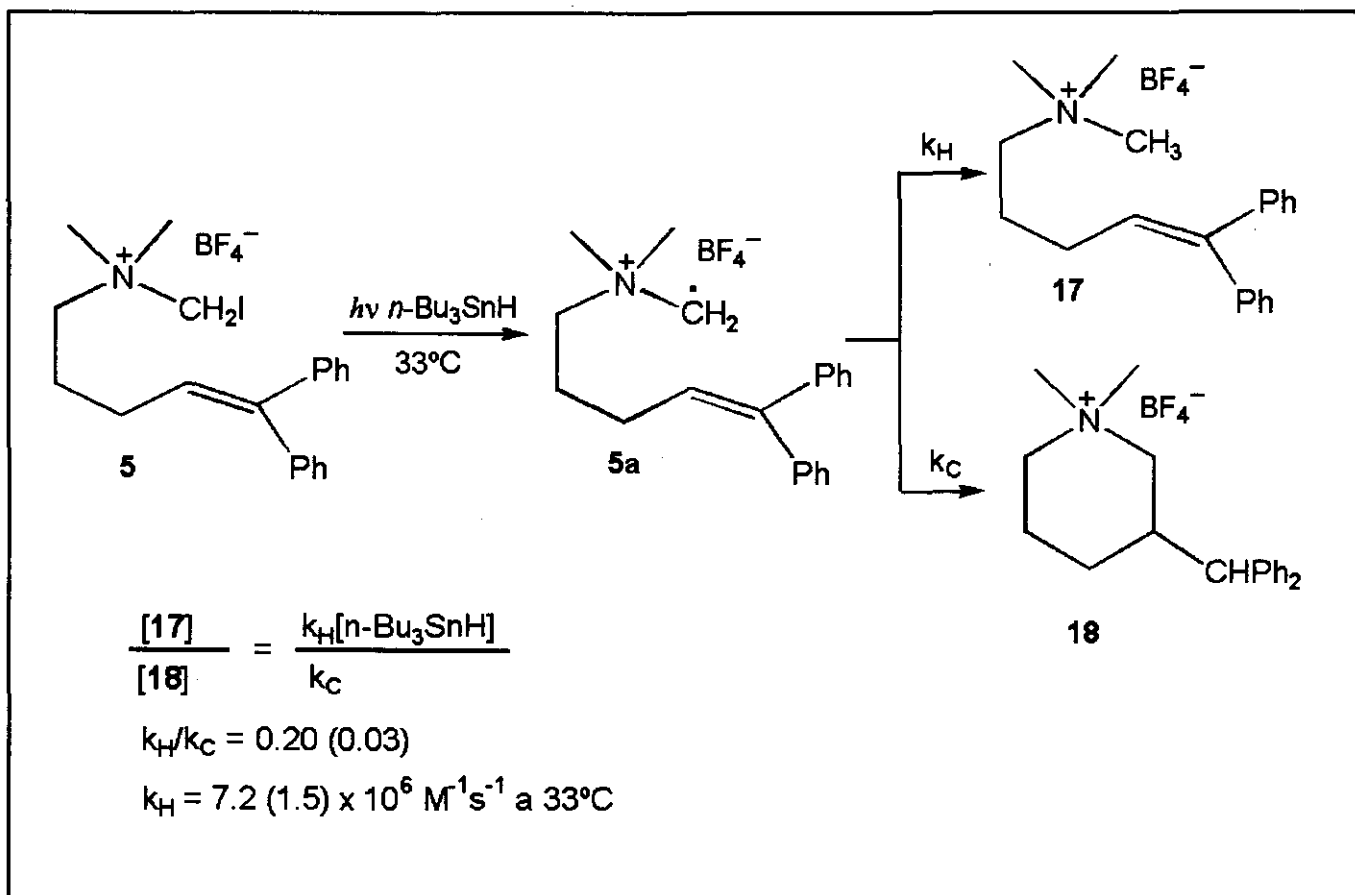
Los estudios computacionales* se enfocaron hacia: (a) determinación del impacto del sustituyente $(\text{CH}_3)_3\text{N}^+$ sobre la estabilidad del radical alquílico y (b) determinación de la estabilidad termodinámica relativa del catión

radical distónico $(\text{CH}_3)_3\text{N}^+\dot{\text{C}}\text{H}_2$ con respecto a su contraparte convencional, $[(\text{CH}_3)_2\text{NCH}_2\text{CH}_3]^{\bullet}$. Los cálculos realizados previamente por Pasto sobre los efectos del sustituyente amonio (NH_3^+) indicaron que este desestabiliza a un radical metílico significativamente

* El Dr. Michael Bartberger realizó los cálculos computacionales, siendo estudiante del doctorado de Química de la University of Florida e integrante del grupo de investigación del Dr. William R. Dolbier, Jr.



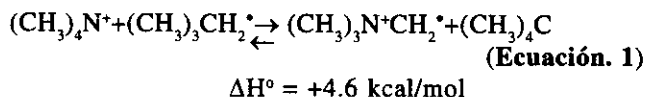
Esquema 4



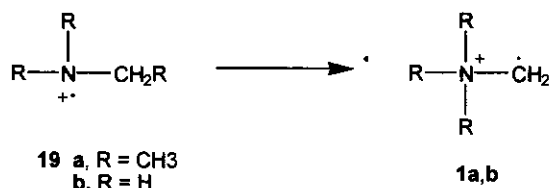
Esquema 5

(RSE \sim -4 kcal/mol),²⁰ mientras que los cálculos de Radom indicaron que el catión radical distónico ($\text{NH}_3^+\text{CH}_2^\bullet$) es ligeramente más estable (\sim -1 kcal/mol) que su isómero convencional $[\text{NH}_2\text{CH}_3]^{+\bullet}$.²¹

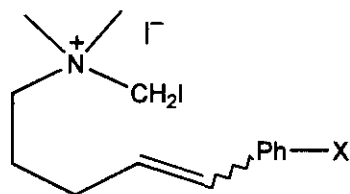
Los resultados de Pasto para el sustituyente NH_3^+ , combinados con la estimación experimental de Bordwell, de la desestabilización del radical metílico de \sim -5 kcal/mol para el sustituyente $(\text{CH}_3)_3\text{N}^+$,²² indicaron una influencia similar de esos sustituyentes sobre la estabilidad del radical. Los estudios computacionales llevados a cabo por Bartberger sobre la ecuación 1 son consistentes con las estimaciones de los investigadores anteriores:



En contraste con el efecto similar de los sustituyentes NH_3^+ y $(\text{CH}_3)_3\text{N}^+$ sobre la estabilidad del radical, se observó que la presencia de grupos metilo tenían un gran impacto sobre la estabilidad del radical distónico vs. el radical convencional. Consistente con los cálculos de Radom sobre el sistema patrón, Bartberger encontró que el catión radical distónico patrón, **1b**, es ligeramente más estable que su isómero convencional **19b**. Sin embargo, se encontró que el análogo **1a**, sustituido por metilo, está desfavorecido por más de 12 kcal/mol, con respecto a su isómero convencional **19a**.



De otro lado, en el estudio de Hammett, se utilizaron una serie de sales de amonio *p*-sustituidas N,N-dimetil-N-yodometil-5-aryl-4-pentenamonio **7-11** (X = OCH₃, CF₃, CH₃, Cl) en experimentos de competencia usando el reactivo *n*-Bu₃SnH como agente reductor. Los datos obtenidos en este estudio se muestran en la Tabla 1.



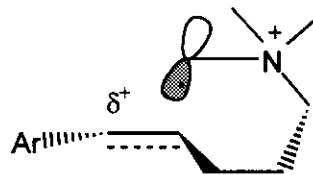
7-11

Tabla 1. Constante de velocidad para las ciclaciones de radicales *p*-sustituidos N,N-dimetil-N-(5-aryl-4-pentenil)metanamonio-1-il, **7**, **8**, **9**, **10** y **11**.

Precursor	Sustituyente X	$k_c \times 10^7 \text{ s}^{-1}$	$\log k_{rel}$	σ^+
7	H	2.6 ± 0.3	0	0
8	OCH ₃	5.5 ± 0.9	0.32	-0.78
9	CF ₃	2.1 ± 0.3	-0.09	0.61
10	CH ₃	3.2 ± 0.5	0.09	-0.31
11	Cl	2.5 ± 0.3	-0.02	0.11

^a Todos los errores están propagados; ^b los rendimientos en todos los casos fueron >90%.

La gráfica de Hammett derivada a partir del $\log k_{rel}$ vs. los valores σ^+ de Hammett de los sustituyentes dió una buena correlación ($\rho^+ = -0.29$, $\langle r \rangle = 0.954$), mientras que ni los valores de σ ni de σ^+ se encontraron que correlacionaran bien con los datos. Se conoce que una buena correlación con σ^+ generalmente indica una interacción conjugativa del sustituyente en la posición *para*, con el sitio de reacción, y el valor $-\rho$ indica deslocalización a un sitio electrodeficiente. Así, el estado de transición para la ciclación de este radical altamente reactivo y electrofílico, debe ser por lo tanto temprano con una polarización significativa pero con un pequeño carácter radical desarrollado en el sitio benéfico.



La alta reactividad observada para las reacciones de ciclación de **5a**, **6a** y **7a** y la reacción de transferencia de hidrógeno de **5a**, puede derivarse de alguna combinación de los siguientes factores: el carácter electrofílico (como se demostró por el estudio de Hammett), la inestabilidad termodinámica (como se demostró por estudios computacionales) y el efecto del *gem*-dimetilo. Los dos grupos metilo enlazados al nitrógeno del sistema radical alquénico amoniometil **5a**, **6a** y **7a** tendrán un impacto significativo sobre su constante de velocidad de ciclación, debido al efecto Thorpe-Ingold (*gem*-dimetil). Beckwith encontró que los sustituyentes *gem*-dimetilo en la posición 2 conllevan a un aumento de \sim 16 veces para las ciclaciones 5-*exo*-hexenil.¹⁹ Asumiendo que un aumento similar pueda ser esperado para las ciclaciones 6-*exo*-heptenil, el aumento neto debido al sustituyente amonio en las ciclaciones de **5a** y **6a** se reducirá a los factores de \sim 4 y \sim 12, respectivamente.

Conclusiones

En conclusión, los cationes radicales α -amonio distónicos se han generado a propósito y estudiado mecanísticamente en solución. Se cree que la interacción π sobre el catión podría estar afectando la baja reactividad bimolecular de **1a** hacia la adición a alquenos, ya que este tipo de interacción fue observado en estudios de fase gaseosa. A partir de los estudios cinéticos se puede concluir que los radicales sustituidos con un sustituyente α -amonio exhiben un comportamiento el cual es típico de otro radical basado en carbono, pero que éstos son algo más reactivos que los radicales análogos hidrocarbonados en ambos procesos, abstracción de hidrógeno y sus ciclaciones. Así, se sugirió que esta mayor reactividad se deriva, al menos en parte, del carácter electrofílico esperado de los radicales α -amonio metil y su inestabilidad termodinámica.

Referencias

1. Yates, B. F.; Bouma, W. J.; Radom, L. *J. Am. Chem. Soc.* **1984**, 106, 5805.
2. Yates, B. F.; Bouma, W. J.; Radom, L. *Tetrahedron* **1986**, 42, 6225-6234.
3. Hammerum, S. *Mass Spectrom. Rev.* **1988**, 7, 123.
4. Hammerum, S. *Mass Spectrom. Rev.* **1988**, 7, 123.
5. Stirk, K. M.; Kiminkinen, L. K. M.; Kenttämää, H. I. *Chem. Rev.* **1992**, 92, 1649-1664.
6. Chyall, L. J.; Byrd, M. H. C.; Kenttämää, H. I. *J. Am. Chem. Soc.* **1994**, 116, 10767-10772.
7. Ma, J. C.; Dougherty, D. A. *Chem. Rev.* **1997**, 97, 1303-1324.
8. Almarzoqi, B.; George, A. V.; Isaacs, N. S. *Tetrahedron* **1986**, 42, 601-607.
9. Laird, T.; William, H. *J. Chem. Soc. C.* **1971**, 3471-3474.
10. Hansch, C.; Leo, A.; Taft, R. W. *Chem. Rev.* **1991**, 91, 165-195.
11. Avila, D. V.; Ingold, K. U.; Luszytk, J.; Dolbier, W. R., Jr.; Pan, H. Q. *J. Org. Chem.* **1996**, 61, 2027-2030.
12. Grillot, G. F.; Thompson, H. G. *J. Org. Chem.* **1957**, 22, 706.
13. Della, E. W.; Knill, A. M.; Smith, P. A. *J. Chem. Soc., Chem. Commun.* **1996**, 1637-1638.
14. Kazanis, S.; Azarani, A.; Johnston, L. J. *J. Phys. Chem.* **1991**, 95, 4430-4435.
15. All stated errors correspond to 2σ . They include both random and propagated errors, as appropriate.
16. Newcomb, M.; Horner, J. H.; Filipkowsky, M. A.; Ha, C.; Park, S. U. *J. Am. Chem. Soc.* **1995**, 117, 3674-3684.
17. Musa, O. M.; Horner, J. H.; Shanin, H. E.; Newcomb, M.; *J. Am. Chem. Soc.* **1996**, 118, 3862-3868.
18. Chatgililoglu, C.; Ingold, K. U.; Luszytk, J.; Dolbier, W. R., Jr.; Pan, H. Q.; Muir, M. *J. Am. Chem. Soc.* **1994**, 116, 99-104.
19. Beckwith, A. L. J.; Schiesser, C. H. *Tetrahedron* **1985**, 41, 3925-3941.
20. Pasto, D. J.; Krasnansky, R.; Zercher, C. *J. Org. Chem.* **1987**, 52, 3062-3072.
21. Gauld, J. W.; Radom, L. *J. Phys. Chem.* **1994**, 98, 777-784.
22. a) Bordwell, F. G.; Cheng, J. -P.; Seyedrezai, S. E.; Wilson, C. A. *J. Am. Chem. Soc.* **1988**, 110, 8178-8183;
b) Bordwell, F. G.; Lynch, T.-Y. *J. Am. Chem. Soc.* **1989**, 111, 7558-7562. All stated errors correspond to $2s$. They include both random and propagated errors, as appropriate.

CRUSTACEOS DECAPODOS DE FONDOS BLANDOS, EN LA FRANJA COSTERA DEL DEPARTAMENTO DEL MAGDALENA, CARIBE COLOMBIANO¹

por

Martha Lucía Cortés S.* & Néstor Hernando Campos**

Resumen

Cortés S. M. L. & N. H. Campos: Crustáceos decápodos de fondos blandos, en la franja costera del Departamento del Magdalena, Caribe Colombiano. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **23**(89): 603-614, 1999. ISSN 0370-3908.

Se registran 162 especies de crustáceos decápodos, pertenecientes a 30 familias, recolectados en arrastres realizados con el B/I Tortuga II entre 1989 y 1990 y con el B/I ANCON entre los meses de octubre de 1991 y abril de 1992 en doce áreas, a lo largo de la costa del departamento del Magdalena. Se complementa esta lista con material recolectado durante otros cruces de investigación en 1993. De las 162 especies, 35 se registran por primera vez para el Caribe colombiano y equivalen al 21.6 % del total. Se destacan dos del género *Solenocera*, registrado por primera vez. Para la familia Goneplacidae se registran nueve especies por primera vez, constituyendo el 90 % del total de especies encontradas en el Caribe colombiano. La familia Majidae es la más representada con 24 especies seguida por las familias Xanthidae y Alpheidae con 14 cada una. El análisis de similaridad sugiere que las zonas más semejantes en cuanto a la composición de los decápodos son las de Concha y Cinto-Guachaquita. Además se diferencian dos regiones, una localizada al sur de la Bahía de Santa Marta y la segunda al norte con una zona de transición entre esta bahía y la zona Taganga-Granate.

Abstract

A total of 162 crustacean decapods species belonging to 30 families, is reported based on collections among the Gulf of Salamanca and the mouth of the Piedras river in the Natural

* INVEMAR, A.A. 1016, Santa Marta, Colombia.

** Inst. Cienc. Nat., Universidad Nacional de Colombia c/ o INVEMAR, A.A. 1016, Santa Marta, Colombia.

1 Contribución N0.158 del Programa de Posgrado en Biología -Línea de Biología Marina de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia.

National Park Tayrona. Thirty five species are recorded, for the first time for the Colombian Caribbean, equivalent to the 21.6% of the total listed. The analysis of similarity permitted to conclude that the most similar areas concerning the composition of the decapods are those of Concha and Cinto-Guachaquita, and clearly are differentiated two regions, located to the south of the Santa Marta Bay and the other north of this.

Introducción

A lo largo de la franja costera del Departamento del Magdalena se han venido realizando recolectas sistemáticas de macrofauna bentónica, de los fondos sedimentarios. Parte de esta información ha sido publicada, tal es el caso de la descripción de *Pylopagurus pattiae* y *Xylopagurus tayrona* como especies nuevas por Lemaitre y Campos (1993). La información restante se encuentra consignada en los informes respectivos (Díaz *et al.*, 1990; Blanco *et al.*, 1994).

La fauna de crustáceos decápodos de fondos blandos de la región de Santa Marta, es escasamente conocida. Además del trabajo mencionado anteriormente, existen registros esporádicos de grupos, como los de Sánchez & Campos (1979) para los cangrejos ermitaños, Campos & Manjarrés (1990 y 1991) para la familia Parthenopidae y Campos & Sánchez (1995) que revisaron el género *Paguristes* e incluyeron la descripción de dos nuevas especies. Tan sólo en un trabajo se describe toda la fauna de crustáceos decápodos como componente de la macrofauna, en los fondos blandos (Puentes *et al.*, 1990).

El presente estudio incluye una lista de los crustáceos decápodos recolectados a lo largo de la franja costera del municipio de Santa Marta, sobre fondos blandos; se dan además algunas características básicas del sustrato (tipos de fondos y comunidades). Se discute sobre la distribución.

Area de estudio

La investigación se desarrolló en la franja costera comprendida desde Bocas de Ceniza (desembocadura del Río Magdalena) y la desembocadura del Río Piedra, límite oriental del Parque Nacional Natural Tayrona (PNNT), en la franja suroccidental de la Guajira. En esta franja se distinguen dos regiones claramente delimitadas, la primera se extiende entre la desembocadura del Río Magdalena y la Punta Gloria, en la parte sur del área de influencia del municipio de Santa Marta, y la segunda localizada entre esta punta y el Río Piedras, incluyendo el PNNT.

Se denomina Golfo de Salamanca al cuerpo de aguas del Mar Caribe con una extensión aproximada de 400 km², comprendido dentro de una línea imaginaria que une las Bocas de Ceniza (Atlántico) y el Cabo de la Aguja (Magdalena), siendo su margen continental el litoral entre estos dos puntos. De éste, gran parte corresponde a la costa del Parque Nacional Isla de Salamanca, la razón de su nombre, con una superficie de 1370 Km² (Blanco, 1993). Esta área se caracteriza por presentar una plataforma continental inicialmente estrecha frente a Bocas de Ceniza, seguida hacia el oeste por un lóbulo antiguo del delta del Río Magdalena (Erffa, 1973), que se continúa en una plataforma que se va ensanchando hasta encontrar su máxima amplitud frente a la Ciénaga Grande de Santa Marta, para estrecharse nuevamente en cercanías de Santa Marta, (Molina, 1990).

La sedimentación en la plataforma continental, al sur de Punta Gloria, es esencialmente de origen continental (Lorin *et al.*, 1973; García & Sandoval, 1983; Blanco, 1988), constituida por arenas grises de grano fino en la parte interna de la plataforma, y por lodos acumulados cerca a la desembocadura del Río Magdalena y en la parte externa de la plataforma. La costa de este sector es principalmente arenosa formada por playas y extensas barras marinas, como la Isla de Salamanca (Guzmán, 1993). La zona costera entre Ciénaga y Barranquilla consiste de depósitos recientes producto de la destrucción (por erosión y transgresión del mar) hace aproximadamente 2400 años de dos antiguos deltas del Río Magdalena (Erffa, 1973; Cohen & Wiedemann, 1973).

La región comprendida entre Punta Gloria y la desembocadura del Río Piedras se caracteriza por la presencia de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), cuyas estribaciones se adentran abruptamente en el mar y dan al litoral un aspecto de costas de rías, con bahías y cabos rocosos (Wilhelm, 1954; Díaz, 1990). Según Blanco (1988) esta región se caracteriza por presentar aguas generalmente claras, con fondos rocosos correspondientes a las estribaciones de la SNSM. En las bahías se encuentran sustrato blando de origen continental y detrítico provenientes de los arrecifes coralinos y praderas de fanerógamas.

Materiales y métodos

Las recolecciones se han realizado desde 1989 en diferentes fases, dependiendo de la disponibilidad de recursos y del proyecto en desarrollo.

Entre 1989 y 1990 se hicieron los cruceros del primer período, en la franja comprendida entre Punta Gloria, al sur de la Bahía del Rodadero y Cañaveral hasta 60 m de profundidad, con el B/I Tortuga II.

Los cruceros comprendidos entre los meses de octubre de 1991 y abril de 1992, se hicieron en la franja suroccidental, desde Punta Gloria hasta Bocas de Ceniza, en la desembocadura del Río Magdalena, entre 12 y 92 m de profundidad, con el barco de investigaciones B/I ANCON del INVEMAR. Además se incluyen muestras colectadas en este barco, en faenas realizadas durante periodos posteriores, en 1993.

Las recolecciones se hicieron con una red de arrastre para peces demersales, y con una changa dotada de patines y cadena. Después de capturadas y separadas la mues-

tras en la embarcación, se fijaron en alcohol al 70% y se trasladaron al laboratorio para su identificación, utilizando la literatura disponible, básicamente los trabajos de Rathbun (1925), Vélez (1977), Werding (1977 y 1984), Pérez - Farfante (1978), Rodríguez (1979), Holthuis (1980), Rodríguez (1980), Williams (1984), Wagner (1990) y Werding & Müller (1990)

El área de estudio se dividió en doce zonas (Fig. 1), así:

Zona 1: Frente a la Boca del Río Viejo (arenas medias y consolidadas) (Blanco, 1993). Los fragmentos de arena consolidada, cuya apariencia externa es de "beach rocks", son areniscas de grano grueso con bajo contenido de CaCO_3 , y de origen terrígeno (Guzmán, 1993).

Zona 2: El Banco de las Animas (Sustrato duro y algas) (Blanco, 1993) también llamado zona mixta (Guzmán, 1993) o fondos mixtos (Cortés & Criales, 1990); está conformado por sustrato duro, formaciones arrecifales y arenas consolidadas. El sustrato duro se encontró constituido por

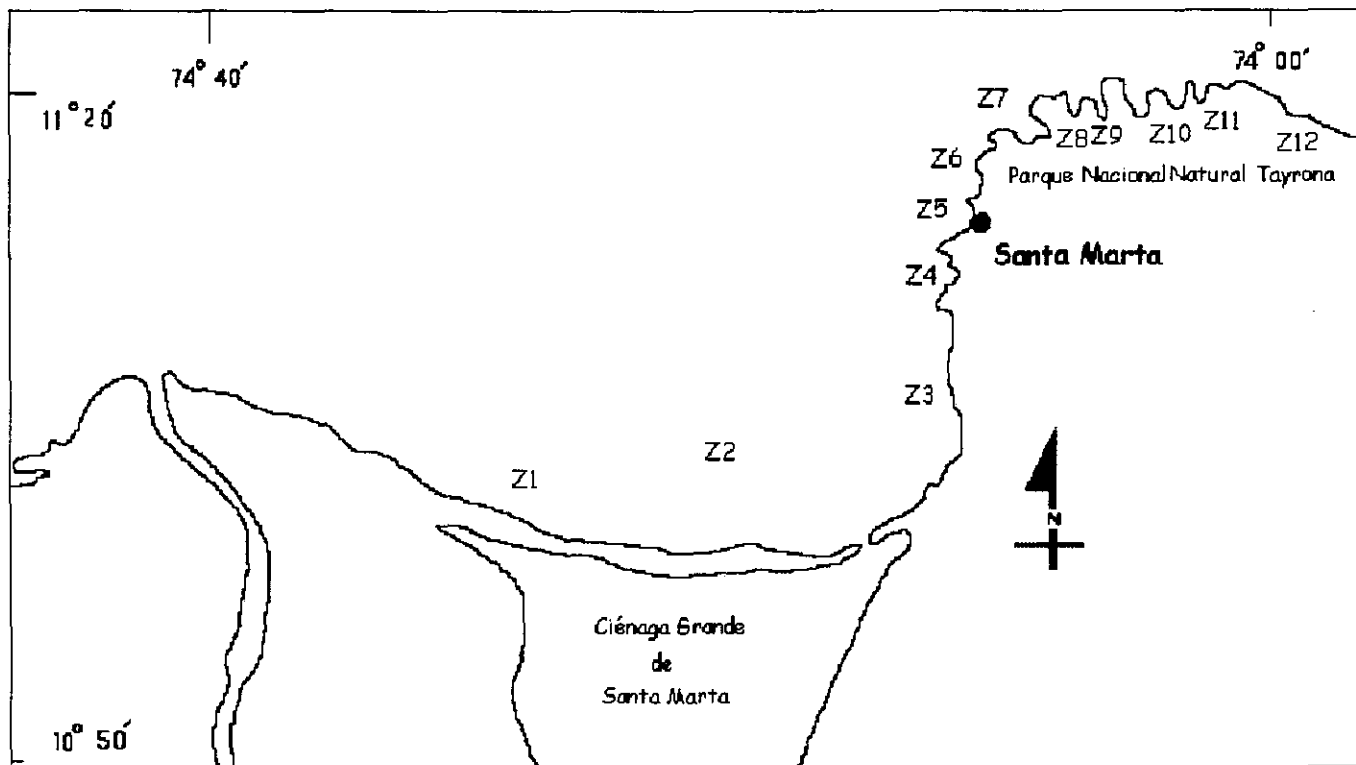


Figura 1. Localización de las estaciones de recolección en la franja costera del Departamento del Magdalena. Z1: Frente a la boca del Río Viejo. Z2: El Banco de las Animas. Z3: Aeropuerto Simón Bolívar. Z4: Bahía del Rodadero. Z5: Bahía de Santa Marta. Z6: Bahía de Taganga - Granate. Z7: Bahía de Concha. Z8: Bahía de Chengue. Z9: Bahía de Gayraca. Z10: Bahía de Nenguange. Z11: Bahía de Cinto - Guachaquita. Z12: Cañaveral.

fragmentos de "piedras negras", que corresponden a lodo consolidado, con matriz calcárea y alto contenido de materia orgánica. En esta zona se encuentra el banco arrecifal descrito por **Blanco et al.** (1994), conformado aparentemente por el coral hermatípico *Agaricia cf. grahamae*.

Zona 3: Frente al aeropuerto Simón Bolívar y al municipio de Ciénaga (cienos) (**Blanco, 1993; Guzmán, 1993**).

Zona 4: Comprende la Bahía del Rodadero hasta la playa Inca Inca, desde Punta Gloria en el extremo sur, hasta la Punta de Gaira, en el extremo norte de la Bahía del Rodadero.

Zona 5: Comprende la Bahía de Santa Marta y es probablemente de las más alteradas por las descargas de aguas negras y por las actividades portuarias.

Zona 6: Comprende el área de influencia de la Bahía de Taganga y la Ensenada de Granate.

Zona 7: Comprende la primera bahía del Parque Nacional Tayrona, la Bahía de Concha.

Zona 8: Comprende la Bahía de Chengue, en el Parque Nacional Natural Tayrona.

Zona 9: Comprende la Bahía de Gayraca, en el Parque Nacional Natural Tayrona.

Zona 10: Comprende la Bahía de Nenguange, que es la bahía más grande de todas las del Parque Nacional Natural Tayrona.

Zona 11: Comprende las ensenadas de Cinto y Guachaquita, en el costado oriental del Parque Nacional Natural Tayrona.

Zona 12: Comprende toda el área de Cañaveral (PNNT), hasta la desembocadura del Río Piedra en el costado nororiental del Departamento del Magdalena.

Resultados y discusión

De acuerdo con la ubicación de las zonas donde se realizaron los arrastres y teniendo en cuenta el tipo de fondo señalados en el mapa del análisis granulométrico, presentado por **Molina, (1990) y Guzmán (1983)** las capturas se hicieron predominantemente sobre fondos de arenas medias, fondos de arena gruesa y lodos.

En la tabla 1 se presenta la lista de las especies de los decápodos recolectados y la distribución en las 12 zonas, agrupados por familia.

En total se capturaron representantes de 162 especies de crustáceos decápodos pertenecientes a 30 familias. De éstas, solamente los representantes de las especies *Iliacantha liodactylus*, *Parthenope serrata*, *Cronius tumidulus*, *Portunus anceps* y *P. spinicarpus* se colectaron en ocho estaciones, siendo además las distribuidas más ampliamente a lo largo de la costa del Magdalena, desde la zona 1 hasta la 12. Igualmente, del total de especies, 67 se recolectaron tan sólo en una estación, que representa un porcentaje cercano al 50 %, lo cual puede significar la presencia de alguna manera de barrera que separan las diferentes áreas de recolección, o condiciones ambientales que restringe la distribución a lugares muy localizados.

En la figura 2 se presenta el número de especies por familia, el de especies nuevas y el porcentaje equivalente de especies nuevas. De las 162 especies registradas en el presente trabajo 35 corresponden a registros nuevos, lo que equivale a un 21.6 % del total. Dentro de este contexto se destaca la familia Solenoceridae (3), para la cual las dos especies encontradas (*Solenocera atlantidis* y *S. vioscai*) se registran por primera vez para el Caribe colombiano; la primera ya ha sido registrada en el Golfo de México, cerca a la desembocadura del Río Mississippi y de Suriname y según **Rodríguez, (1980)** puede estar presente en Venezuela, **Huff & Cobb (1979)** anotan que esta especie se distribuye en la costa Caribe de Suramérica, **Williams (1984)** da un rango de distribución entre el Cabo Lookout a la Florida, en el Golfo de México, el presente registro confirma su presencia en el Caribe sur; la segunda especie fue observada por **Rodríguez (1980)** en la costa de Venezuela. La familia Dorippidae (21), está presente con una sola especie, la cual es también registrada por primera vez (*Ethusa M. americana*); previamente había sido registrada desde Carolina del Norte, hasta la Florida, de Puerto Rico, Venezuela y Santo Tomás, además se ha encontrado en el Golfo de California y en Panamá (**Rodríguez, 1980; Williams, 1984**). La familia Goneplacidae (28), tan sólo conocida por el registro de *Speocarcinus carolinense* (**Puentes et al., 1990**), aparece ahora acompañada por nueve especies adicionales, no registradas para el área, constituyendo éstas el 90 % del total de registros para esta zona (*Speocarcinus lobatus*, *Goneplax tridentata*, *Chasmocarcinus cylindricus*, *Euriplex nitida*, *Glyptoplax smithii*, *Panoplax depressa*, *Nanoplax xanthiformis*, *Prionoplax atlantica* y *Tetraplex quadridentata*). Para la familia Albuneidae (18) se incluye una especie (*Lepidopa websteri*), nueva para el área, constituyéndose así en la tercera especie de esta familia en la región. Con porcentajes iguales a la anterior familia (33.3%) están la

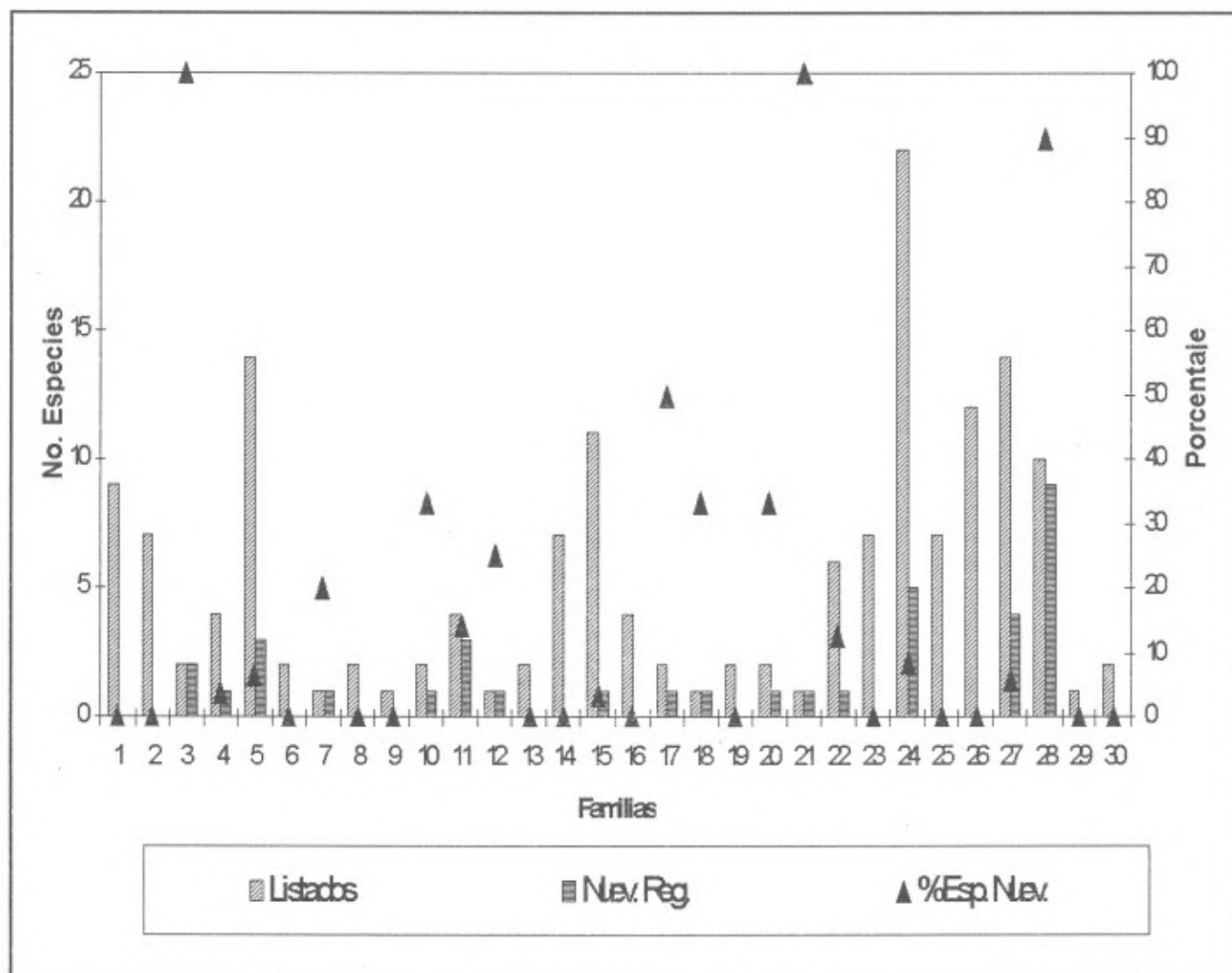


Figura 2. Número de especies por familia, número de registros nuevo y porcentaje equivalente de especies nuevas para el área de estudio. 1) Penaeidae. 2) Solenoceridae. 3) Sicyoniidae. 4) Palaemidae. 5) Alpheidae. 6) Hippolytidae. 7) Processidae. 8) Stenopodidae. 9) Palinuridae. 10) Scyllaridae. 11) Callianassidae. 12) Axiidae. 13) Upogebiidae. 14) Diogenidae. 15) Paguridae. 16) Porcellanidae. 17) Galatheididae. 18) Albuneidae. 19) Raninidae. 20) Dromiidae. 21) Dorippidae. 22) Calappidae. 23) Leucosiidae. 24) Majidae. 25) Parthenopidae. 26) Portunidae. 27) Xanthidae. 28) Goneplacidae. 29) Grapsidae. 30) Palicidae.

Scyllaridae (10) y la Dromiidae (20); para la primera se registra por primera vez *Scyllarus chacei* siendo éste el tercer registro de esta familia para el área; para la segunda familia la especie *Hypoconcha arcuata* es registrada por primera vez, constituyéndose al igual que la familia anterior, en el tercero para ésta. Otros registros son para la familia Palaemonidae (4) *Anchistoides antiguensis*; para la familia Alpheidae (5) *Alpheus simus*, *Synalpheus curacaoensis* y *S. herricki*; para la familia Processidae (7) *Processa parva*; para Callianassidae (11) tres de las cuatro especies anotadas en el presente trabajo son re-

gistros nuevos para esta zona del Caribe representado 14.3 % del total de especies anotadas, *Callianassa asper*, *C. atlantica* y *Callidactylus asper*. Para la familia Axiidae (12) se registra *Axiopsis jenneri* para un total de cuatro especies anotadas. Para la familia Galatheididae (17) se registra por primera vez *Munida irrassa* llegando así a 5 especies. Para la familia Calappidae (22) se registra también una sola especie (*Calappa gallus*), para un total de 8. Para la familia Majidae (24) a pesar de que se señalan 5 especies nuevas para el Caribe colombiano (*Arachnopsis filipes*, *Euprognatha rastellifera*, *Collodes armatus*,

Continuación Tabla 1

Especies\ Zonas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Especies\ Zonas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
<i>Calappa ocellata</i>			X										<i>Cronius tumidulus</i> ¹			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
<i>Calappa sulcata</i>		X	X	X		X				X	X		<i>Arenaeus cribarius</i>	X											X		
<i>Cycloes bairdii</i>				X			X	X			X	X	<i>Callinectes sapidus</i>	X	X												
<i>Hepatus pudibundus</i>		X											<i>Portunus anceps</i> ¹	X	X	X	X	X	X				X	X			
23. Fam. LEUCOSIIDAE													<i>Portunus ventralis</i>		X												
<i>Ebalia cariosa</i>					X	X					X		<i>Portunus gibbesii</i>		X												
<i>Ebalia stimpsoni</i>						X					X		<i>Portunus spinimanus</i>					X	X				X				
<i>Persephone punctata</i>		X											<i>Portunus spinicarpus</i> ¹	X	X	X	X	X	X			X	X				
<i>Callydactylus asper</i>		X	X			X					X		<i>Portunus ordwayi</i>			X					X						
<i>Iliacantha intermedia</i>						X					X		<i>Lupella forceps</i>			X	X		X								
<i>Iliacantha liodactylus</i> ¹		X	X	X	X	X				X	X	X	<i>Charybdis helleri</i>		X										X		
<i>Randallia curacaoensis</i>											X		27. Fam. XANTHIDAE														
24. Fam. MAJIDAE													<i>Micropanope sculptipes</i>							X	X			X			
<i>Stenorhynchus seticornis</i>			X	X	X	X	X	X		X	X		<i>Micropanope xanthiformis</i>												X		
<i>Podochela grossipes</i>			X	X	X	X	X	X	X	X	X		<i>Micropanope sp.</i>						X	X		X		X			
<i>Podochela macrodera</i>						X				X	X		<i>Panopeus occidentalis</i>						X						X		
<i>Podochela gracilipes</i>						X	X			X			<i>Panopeus austrobesus</i>												X		
<i>Anasimus latus</i>				X	X		X	X	X	X			<i>Paractea rufopunctata nodosa</i>												X		
<i>Arachnopsis filipes</i>										X			<i>Neopanope sp.</i>										X				
<i>Euprognatha rastellifera</i>			X	X	X	X	X	X	X	X			<i>Pseudomedaeus sp.</i>							X							
<i>Collodes armatus</i>										X	X		<i>Pilumnus caribaeus</i>	X					X			X	X				
<i>Batrachonotus fragosus</i>			X	X		X	X	X	X	X	X		<i>Pilumnus dasypodus</i>				X						X	X			
<i>Notolopas brasiliensis</i>	X												<i>Pilumnus floridanus</i>					X	X	X		X	X				
<i>Hemus cruistulipes</i>					X								<i>Pilumnus panosus</i>												X		
<i>Mocosoia crebripunctata</i>					X								<i>Pilumnus sayi</i>								X						
<i>Epialtus brasiliensis</i>											X		<i>Pilumnoplax elata</i>			X											
<i>Mithrax hispidus</i>	X	X				X	X	X	X		X																
<i>Mithrax cornutus</i>											X	X															
<i>Mithraculus cinctimanus</i>							X						28. Fam. GONEPLACIDAE														
<i>Stenocionops furcata</i>							X						<i>Speocarcinus carolinensis</i>					X	X								
<i>Macrocoeloma intermedium</i>							X				X		<i>Speocarcinus lobatus</i>			X									X		
<i>Macrocoeloma laevigatum</i>	X												<i>Goneplax tridentata</i>		X	X				X							
<i>Macrocoeloma camptocerum</i>					X						X		<i>Chasmocarcinus cylindricus</i>		X	X		X							X		
<i>Macrocoeloma eutheca</i>											X		<i>Euriplax nitida</i>				X	X	X								
<i>Microphrys bicornutus</i>										X	X		<i>Glyptoplax smithii</i>											X			
25. Fam. PARTHENOPIIDAE													<i>Panoplax depressa</i>					X									
<i>Heterocrypta tommasii</i>		X											<i>Nanoplax xanthiformis</i>					X									
<i>Leiolambrus nitidus</i>		X	X	X		X				X	X		<i>Prionoplax atlantica</i>					X							X		
<i>Mesorhoea sexpinosa</i>					X	X	X			X	X		<i>Tetraplax quadridentata</i>							X							
<i>Thyrolambrus astroides</i>											X		29. Fam. GRAPSIDAE														
<i>Parthenope serrata</i> ¹		X	X	X	X	X	X			X	X		<i>Euchirograpsus americanus</i>							X	X				X		
<i>Parthenope fraterculus</i>							X	X		X	X		30. Fam. PALICIDAE.														
<i>Parthenope agona</i>					X	X				X	X		<i>Palicus alternatus</i>					X	X	X	X		X	X			
26. Fam. PORTUNIDAE													<i>Palicus sp.</i>												X		
<i>Cronius ruber</i>											X																
Total																8	6	37	30	47	28	63	52	9	45	91	15

- Zonas:** 1. Boca del Río Viejo costado occidental del departamento
 2. Banco de las Animas, frente a la Isla de Salamanca
 3. Frente al aeropuerto Simón Bolívar.
 4. Bahía del Rodadero hasta Punta Gaira.
 5. Bahía de Santa Marta.
 6. Bahía de Taganga y Ensenada de Granate.

7. Bahía de Concha
 8. Bahía de Chengue.
 9. Bahía de Gayraca.
 10. Bahía de Nenguange.
 11. Ensenadas de Cinto y Guachaquita.
 12. Cañaveral hasta la desembocadura del Río Piedras, costado oriental del Departamento del Magdalena.

Tabla 2. Porcentaje de cobertura por familias en las doce zonas de recolección. Se da el número de especies registradas por familia, el número de encuentros de las especies de cada familia en las zonas y el número total de especies por familia esperado si éstas estuviesen presentes en todas las estaciones.

FAMILIAS	# ESPECIE	(A) = # ENCUENTRO (OBSERVADO)	(B) = # TOTAL x ESTACIONES (ESPERADO)	COBERTURA = A/(B x 100)
1) Penaeidae.	9	25	108	23.15
2) Sicyoniidae.	7	28	84	33.33
3) Solenoceridae.	2	3	24	12.5
4) Palaemidae.	4	6	48	12.5
5) Alpheidae.	14	19	168	11.31
6) Hippolytidae.	2	2	24	8.3
7) Processidae.	1	1	12	8.3
8) Stenopodidae.	2	9	24	37.5
9) Palinuridae.	1	5	12	41.7
10) Scyllaridae.	2	5	24	20.8
11) Callinassidae.	4	8	48	16.67
12) Axiidae.	1	1	12	8.3
13) Upogebiidae.	2	3	24	12.5
14) Diogenidae.	7	24	84	28.6
15) Paguridae.	11	32	132	24.24
16) Porcellanidae.	4	8	48	16.70
17) Galateidae.	2	5	24	20.83
18) Albuneidae.	1	1	12	8.3
19) Raninidae.	2	8	24	33.33
20) Dromiidae.	2	6	24	25.0
21) Dorippidae.	1	3	12	25
22) Calappidae.	6	17	72	23.61
23) Leucosiidae.	7	21	84	25.0
24) Majidae.	22	65	264	24.62
25) Parthenopidae.	7	29	84	34.52
26) Portunidae.	12	41	144	28.47
27) Xanthidae.	14	27	168	16.07
28) Goneplacidae.	10	20	120	16.07
29) Grapsidae.	1	3	12	25.0
30) Palicidae.	2	7	24	29.17

Mocosoa crebripunctata y *Macrocoeloma camptocerum*), el porcentaje en relación con el total de especies ya registradas es bajo (8.4 %). Algo similar se observa para la Xanthidae (27), de la que se registran cuatro especies (*Micropanope xanthiformis*, *Panopeus austrobesus*, *Pilumnus panosus* y *Pilumnoplax elata*), lo que equivale tan sólo a un 5.9 %.

De las 30 familias registradas (162 especies en total), la Majidae (Fig. 2. 24) fue la mejor representada, con 22 especies, equivalentes a 13.6 % del total ($22/162 \times 100$), le siguen las familias Alpheidae (5) y Xanthidae (27) con 14 especies equivalentes al 8.6 %. Las familias menos representadas (una especie para 0.6 %) fueron Processidae (7), Palinuridae (9), Axiidae (12), Albuneidae (18), Dorippidae (21) y Grapsidae (29). De éstas, la mayoría tienen pocos géneros y pocas especies; la familia Grapsidae (29) presenta un mayor número de especies que muchas de las otras familias, pero a diferencia de esas, sólo tiene dos especies netamente marinas (*Euchirograpsus americanus* y *E. antillensis*) en el Atlántico, de las cuales la primera fue señalada por Türkay (1975) para el Caribe colombiano, las restantes son anfibia en la zona intermareal o viven epibioentes en las raíces de los manglares (*Rhizophora mangle*).

Las familias Leucosiidae (23), Parthenopidae (25) y Portunidae (26) son las que presentan especies con distribución más amplia; se recolectaron en ocho estaciones; además la Portunidae estuvo presente con tres especies. De las familias representadas con una sola especie, la Processidae y la Axiidae son las únicas que se hallaron en una sola estación y probablemente constituyen eventos casuales (Fig. 2. 7 y 12).

Para evaluar la importancia real de cada una de las familias se calculó el porcentaje de cobertura para cada una, a lo largo de las zonas de estudio (se dividió para cada familia, el número de veces que se presentó en las doce zonas por el producto del número total de especies de cada familia por las doce zonas multiplicado por cien). La mayor cobertura la presentó la familia Palinuridae, a pesar de haberse capturado representantes de una sola especie, con 41.7 % de cobertura. Le sigue la familia Stenopodidae con el 37.5 %, con solo dos especies. Contrariamente a esto, familias como la Majidae que estuvieron presentes con el mayor número de especies por familia (22) el porcentaje de cobertura fue solamente de 24.6 %, lo cual permite comprobar que la distribución de cada una de las especies es mucho más localizada que otras con una distribución más amplia; para esta el 45 % de especies presentan una distribución muy restringida, cada una en una estación, y tan sólo el 27 % tienen una

distribución más amplia (siete estaciones). Igualmente la familia Portunidae, que a pesar de presentar tres especies como las de la mayor cobertura (*C. tumidulus*, *P. anceps* y *P. spinicarpus*), el porcentaje de cobertura del total de especies alcanza tan sólo al 28.47 %; para esta familia tan sólo el 25 % de sus especies se localizaron en una zona de muestreo, mientras que otro 25 % presentó una distribución más amplia (ocho estaciones). Las familias más restringidas en su distribución fueron la Hippolytidae, la Processidae, la Axiidae y la Albuneidae, con tan sólo 8.33 % de cobertura.

Finalmente las familias Leucosiidae (23) y Parthenopidae (25) tienen un comportamiento semejante en relación con la distribución de sus especies. El porcentaje de especies presentes en una sola estación es del 28.5 % para las dos familias y el 14.2 % corresponde a las especies presentes en ocho estaciones.

En la figura 3 se da la distribución del número de especies por zonas de recolección. En la zona 11 (ensenadas de Cinto y Guachaquita) se recolectaron representantes del mayor número de especies 91 de 162, seguida de las zonas 7 y 8 con 63 y 52 especies respectivamente. En la zona 2 se recolectó el menor número de especies, seis solamente, de las cuales *Penaeus brasiliensis*, *Scyllarides* sp. y *Macrocoeloma laevigatum* sólo se recolectaron en esta estación. De las áreas de recolección en el Parque Nacional Tayrona (Z6 a la Z12), en la Bahía de Gayraca (Z9) se presentó el menor número de especies, se recolectaron representantes tan sólo de 9 especies, las cuales se presentaron por lo menos en otra estación, es decir no se presentaron en esta zona especies "exclusivas". En la zona 1, localizada más al occidente, el número de especies fue superior o igual en varios casos al de las estaciones localizadas hacia el oriente (Z 6 a Z 12).

Se observa un aumento del número de especies de occidente a oriente, elevándose el número después de las zonas 1 y 2, que se demarcan por una fuerte influencia de la Ciénaga Grande de Santa Marta y probablemente del Río Magdalena. El número de especies aumenta hasta la zona 5. En la zona siguiente se presenta un descenso (Taganga-Granate) (Fig. 3).

El análisis de similaridad para datos cualitativos derivado del índice de Jaccard, por el método de agrupamiento promedio aritmético (Fig 4.), muestra una asociación de zonas, donde las más semejantes son las Z7 (Bahía de Concha) y la Z11 (Cinto-Guachaquita). Para estas dos se registraron 45 especies comunes a las dos zonas (28 % del total de especies). Las estaciones restantes del PNNT tienden a unirse alrededor del primer

agrupamiento. De las zonas del PNNT, la Bahía de Gayraca (Z9) es la menos similar con las anteriores, incluso se presenta primero un agrupamiento de zonas localizadas en la parte intermedia, como la de Santa Marta (Z5) y la de Taganga-Granate (Z6) y luego si se asocia con la Z9. Posteriormente a éstas se presenta un agrupamiento de las zonas de Aeropuerto y Rodadero (Z3 y Z4 respectivamente). Las estaciones localizadas en los extremos del área de registro (Boca de Río Viejo -Z1- y Cañaveral -Z12-) formaron un grupo, que son, junto a la

estación del Banco de las Animas (Z2) son las más diferentes, encontrándose las dos primeras unidas con el grupo restante a una distancia de 0.93 y la última a 0.97. De acuerdo a este análisis se pueden diferenciar claramente 3 zonas demarcadas, la primera constituida por las bahías del PNNT, la segunda influida por las descargas del río Magdalena y la Ciénaga Grande de Santa Marta, a las cuales por sus características se integra la de Cañaveral, esta zona es influida por la descarga del Río Piedras, aportando gran cantidad de material alóctono (sedimen-

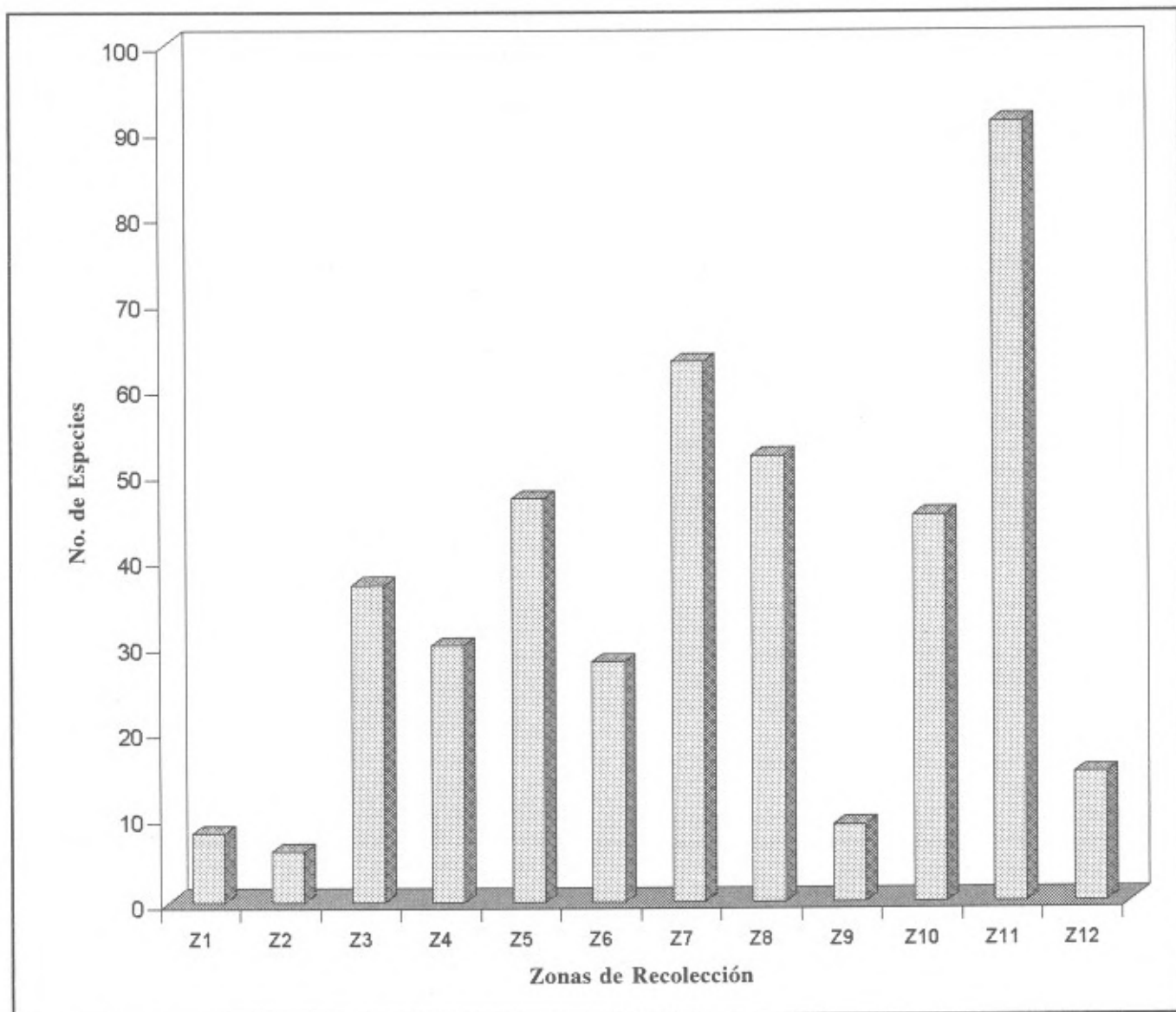


Figura 3. Número de especies por zona registrada. Z 1: Frente a la Boca del Río Viejo, Z 2: El Banco de las Animas, Z 3: Aeropuerto Simón Bolívar, Z 4: Bahía del Rodadero, Z 5: Bahía de Santa Marta, Z 6: Bahía de Taganga y Ensenada de Granate, Z 7: Bahía de Concha, Z 8: Bahía de Chengue, Z 9: Bahía de Gayraca, Z 10: Bahía de Nenguange, Z 11: Ensenadas de Cinto y Guachaquita, Z 12 Cañaveral.

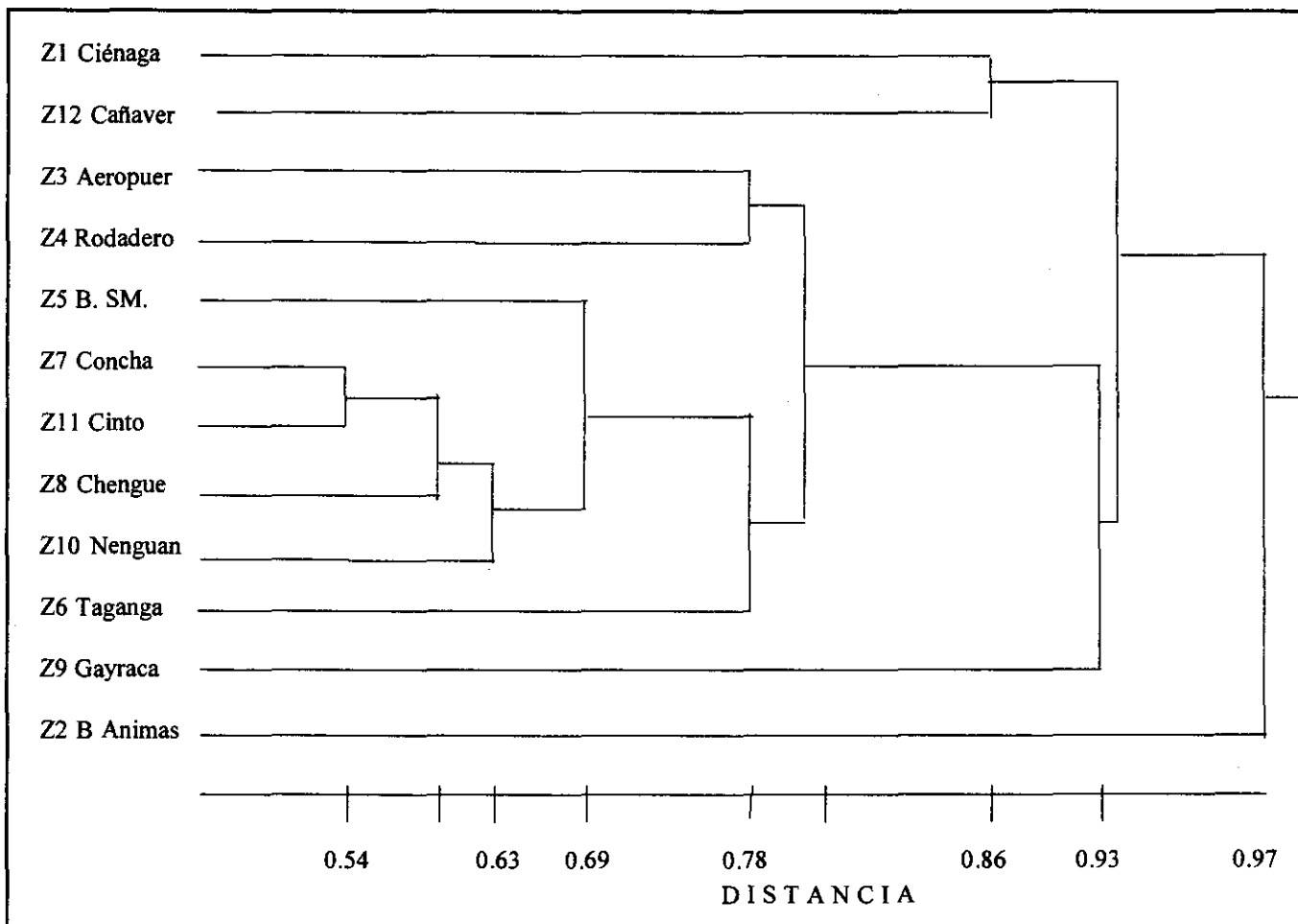


Figura 4. Dendrograma de similaridad entre las zonas de recolección calculado con el índice de Jaccard. Z 1: Frente a la Boca del Río Viejo, Z 2: El Banco de las Animas, Z 3: Aeropuerto Simón Bolívar, Z 4: Bahía del Rodadero, Z 5: Bahía de Santa Marta, Z 6: Bahía de Taganga y Ensenada de Granate, Z 7: Bahía de Concha, Z 8: Bahía de Chengue, Z 9: Bahía de Gayraca, Z 10: Bahía de Nenguange, Z 11: Ensenadas de Cinto y Guachaquita, Z 12 Cañaveral.

tos finos y gran cantidad de residuos vegetales continentales) y la tercera que se puede considerar más como una zona intermedia, integrada principalmente por las estaciones de Santa Marta, Taganga-Granate.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la tripulación de B/I ANCON del INVEMAR y especialmente al Jefe del proyecto Jacobo Blanco, al Instituto Colombiano Para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología (COLCIENCIAS), quien financió la investigación, además del viaje de uno de los investigadores (NHC) a la reunión de verano de Crustáceos para presentar el trabajo oralmente.

Bibliografía

- Blanco, J. 1988. Las variaciones ambientales estacionales en las aguas costeras y su importancia para la pesca en la región de Santa Marta, Caribe Colombiano. Tesis M. Sc., Biol. Mar., Universidad Nacional de Colombia-INVEMAR, Santa Marta, 50p.
- . 1993. Reconocimiento piloto de fondos, ambiente, fauna asociada y recursos pesqueros en aguas costeras del departamento del Magdalena. Informe final. 106p.
- , J.M. Díaz, G. Ramírez, & M. L. Cortés. 1994. El Banco de las Animas: una amplia formación coralina desarrollada sobre un antiguo delta del río Magdalena. Bol. Ecotrópica.
- Campos, N.H. & G. Manjarrés. 1990. Tres nuevos registros de cangrejos de la familia Parthenopidae (Crustacea: Brachyura: Parthenopoidea) del Caribe colombiano. Carib. Jour. Sci. 26 (3-4): 130-135.

- _____. 1991. Los crustáceos de la Superfamilia Parthenopoidae (Brachyura, Oxyryncha) de la región de Santa Marta. Bol. Ecotrop., 24: 1 - 9, 6 figs.
- _____. & H. Sánchez. 1995. Los cangrejos ermitaños del género *Paguristes* Dana (Anomura: Diogenidae) de la costa norte colombiana, con la descripción de dos nuevas especies. *Caldasia*, 17 (82-85): 569-586.
- Cohen, A. & H. Wiedemann, 1973. Distributional and depositional history of some pre-lagoonal holocene sediments in the Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *Mitt. Inst. Colombo-Aleman Invest. Cient.*, 7: 139-154.
- Cortés, M. L. & M. M. Criales. 1990. Análisis del contenido estomacal del camarón tify *Xiphopenaeus kroyeri* (Heller) (Crustacea: Natantia: Penaeidae). *Inst. Inv. Mar. Punta de Betín*, 19 - 20: 23 - 33.
- Díaz, J. M. (E.). 1990. Estudio ecológico integrado de la zona costera de Santa Marta y Parque Nacional Natural Tayrona. INVEMAR, Informe final, Santa Marta, 440 p.
- _____. et al. 1990. En: Díaz, J. M. (E.). Estudio ecológico integrado de la zona costera de Santa Marta y Parque Nacional Natural Tayrona. INVEMAR, Informe final, Santa Marta, 440 p.
- Erffa, A Von. 1973. Sedimentation, Transport and Erosion an der Nordküste Kolumbiens zwischen Barranquilla und der Sierra Nevada de Santa Marta. *Mitt. Inst. Colombo-Alemán Invest. Cient.*, 7: 155-209.
- García, C. & H. Sandoval. 1983. Comunidades macrozoobénticas de fondos blandos en la plataforma continental de Ciénaga, Caribe Colombiano. Tesis de grado, Facultad de Biol. Mar., Univ. Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, 84P.
- Guzman, A. 1993. La comunidad macrozoobentónica de fondos blandos de la plataforma continental del departamento del Magdalena (Caribe Colombiano). Teisi M.Sc. Univ. Nal de Colombia, Facultad de Ciencias. 74p.
- Holthuis, L. B. 1980. Shrimps and prawns of the world. An Annotated Catalogue of species of Interest to Fisheries. FAO. species catalogue No. 125, vol. 1 271 p.
- Huff, J. A. & S. P. Cobb. 1979. Penaeoid and sergestoid shrimps (Crustacea: Decapoda). *Mem. Hourglass Cruises*. 5(4): 1 - 102.
- Lemaitre, R. & N. H. Campos. 1993. Two new hermit crabs (Crustacea: Decapoda: Paguridae) from the Caribbean sea. *Proc. Biol. Soc. Wash.*, 106 (3): 554 - 565.
- Lorin, J., C. Hernández, A. Rovault & J. Bottagisio. 1973. Estudio sedimentológico de la plataforma continental entre Bocas de Ceniza y Santa Marta. Laboratoire Central D'Hydraulique de France, Barranquilla, 42p. + 50 planos.
- Molina, A. 1990. Estudio geológico de la plataforma continental caribe (Santa Marta -Punta Morro Hermoso). *Memorias VII seminario Nacional Ciencias y Tecnologías del Mar. Calif, Oct. 30-Nov. 2: 120-131.*
- Pérez Farfante, I. 1978. Shrimps and Prawns. En Fischer, W. (Eds) FAO. Identification sheets for fishery purposes. vol. VI: 25-47.
- Puentes, L. G., N. H. Campos & R. Reyes. 1990. Decápodos de fondos blandos hallados en el área comprendida entre Pozos Colorados y la Bahía de Taganga, Caribe colombiano. *Bol. Ecot.*, 23: 31 - 41.
- Rathbun, M. 1925. The spider crabs of America. Smithsonian institution. United states National Museum. Bulletin 129. Washington Government printing office. 599 p.
- Rodríguez, B. D. 1979. Los portúnidos del Caribe Colombiano con énfasis en el Género *Callinectes*. Tesis Biol. Mar. U.J.T.L. 146p.
- Rodríguez, G. 1980. Los crustáceos Decápodos de Venezuela. *Inst. Venezolano de Investigaciones Científicas. Caracas*. 494p.
- Sánchez, H. & N. Campos. 1978. Los cangrejos ermitaños (Crustacea, Anomura, Paguridae) de la costa norte colombiana. *An. Inst. Inv. Mar. Punta de Betín*. 10 (15-62).
- Türkay, M. 1975. Zur Kenntnis der Gattung *Euchirograpsus*, mit Bemerkung zu *Brachygrapsus* und *Litochieira* (Crusta: Decapoda). *Senckenbergiana Biol.* 56 (1/3): 103 - 132.
- Vélez, M. M. 1977. Distribución y ecología de los Majidae (Crustacea: Brachyura) en la región de Santa Marta (Colobia). *An. Inst. Inv. Mar. Punta Betín*. 9: 109-140.
- Wagner, H. P. 1990. The genera *Mithrax* Latreille, 1818 and *Mithraculus* white, 1847 (Crustacea: Brachyura: Majidae) in the Western Atlantic Ocean. *Zoologische verhandelingen*. 264: 65p.
- Werding, B., 1977. Los porcelánidos (Crustacea: Anomura: Porcellanidae) de la región de Santa Marta (Colombia). *An. Inst. Inv. Mar. Punta Betín*. 9: 173- 214 .
- _____. 1984. Porcelánidos (Crustacea: Anomura: Porcellanidae) de la isla de Providencia, Colombia. *An. Inst. Inv. Mar. Punta de Betín*. 14: 3-16.
- _____. & H-G. MULLER. 1990. Frog crabs of the coast of N- Colombia (Crustacea: Decapoda: Raninidae). *Senckenbergiana biol.* 70 (1/3): 202-219.
- Williams, A.B. 1984. Shrimps, lobsters, and crabs of the Atlantic coast of the Eastern United States, Maine to Florida. *Smithsonian Inst. Press, Washington*, 550 p.

THE *ELEUTHERODACTYLUS* OF THE *TAENIATUS* COMPLEX IN WESTERN COLOMBIA: TAXONOMY AND DISTRIBUTION

por

John D. Lynch & Maria Cristina Ardila-Robayo¹

Resumen

Lynch, J. D. & M. C. Ardila-Robayo. The *Eleutherodactylus* of the *taeniatus* complex in western Colombia: taxonomy and distribution. Rev. Acad. Colomb. Cien. 23 (89): 615-624, 1999. ISSN 0370-3908.

Eleutherodactylus taeniatus previamente se confundió con otras especies del género establecidas en alturas moderadas; una de las especies nuevas está confinada a la parte norte de la Cordillera Occidental donde aparentemente sustituye a *E. ptochus*. La otra especie se encuentra en el altiplano antioqueño de la Cordillera Central, mientras que *E. taeniatus* se encuentra por debajo de los 1500m al norte del Chocó biogeográfico y en el Magdalena Medio. Actualmente se conocen siete especies de este complejo en la zona trans-andina de Colombia.

Palabras clave: *Eleutherodactylus* grupo *taeniatus*, Leptodactylidae, Nuevas especies, Distribución, Colombia.

Abstract

Eleutherodactylus taeniatus was confused previously with two other species found at moderate to intermediate elevations. One of the new species is confined to the northern part of the Cordillera Occidental where it apparently replaces *E. ptochus*. The other species is found on the Antioquian altiplano of the Cordillera Central. *Eleutherodactylus taeniatus* occurs at elevations below 1500 m in the northern part of the Chocó biogeographic and in the Magdalena Medio. Presently, seven species of this complex are known in trans-andean Colombia.

Key words: Colombia, *Eleutherodactylus*, Leptodactylidae, New species.

¹ Profesores Asociados del Instituto de Ciencias Naturales- Museo de Historia Natural. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Apartado aéreo 1495. Santafé de Bogotá, D.C., Colombia. E-mail: jlynch@ciencias.unal.edu.co, mcardila@ciencias.ciencias.unal.edu.co.

Introduction

A complex of small, drab *Eleutherodactylus* termed the *frater* Assembly by Flores & Vigle (1994) has grown in number but remains a boring yet challenging complex of species. Perhaps the initial serious sorting out of the confusion was by Lynch (1980) who identified *E. frater* (Werner) as a small species found in the eastern piedmont of Colombia and *E. taeniatus* (Boulenger) as an element of the biogeographic Chocó. However, Lynch's *E. taeniatus* was a mixture of species largely grouped on the basis of size and two features of coloration: the posterior surfaces of the thighs are uniformly brown and the frogs lack a canthal stripe and labial bars anterior to the eyes (drawings in Lynch, 1980, 1998). These two features allow ready sorting of small *Eleutherodactylus* but may be irrelevant in organizing the species of this very diverse genus of frogs.

Here, we are not concerned with the cis-Andean species currently recognized in this assembly (or group) [*E. frater*, *E. incomptus* Lynch & Duellman (including *E. kirklandi* Flores), *E. librarius* Flores & Vigle, *E. martiae* Lynch, *E. ockendeni* (Boulenger), *E. quaquaversus* Lynch, or *E. pecki* Duellman & Lynch] except as concerns some character states of those taxa. This paper concerns the species distributed in the Caribbean and Pacific drainages of Colombia. Five species are recognized currently: *E. miyatai* Lynch from the western flanks of the Cordillera Oriental of Colombia, *E. ptochus* Lynch from the Serranía de los Paraguas and adjacent Risaralda in the Cordillera Occidental of Colombia, *E. suetus* Lynch & Rueda-A. from the eastern flanks of the northern part of the Cordillera Central, *E. taeniatus*, a species restricted to the lowland forests of eastern Panamá, the drainages of the Río Atrato and Río San Juan of western Colombia, and the middle Magdalena, and *E. viejas* Lynch & Rueda-A., a species of low and moderate elevations on each side of the Middle Magdalena. The reports of Lynch (1980) of *E. taeniatus* intermediate elevations of the northern parts of the Cordillera Central and Cordillera Occidental are based on material of species described herein.

Materials and methods

Terminology follows Lynch & Duellman (1997). In the following accounts, we use some abbreviations: E-N (eye to nostril distance), HW (greatest width of head), IOD (interorbital distance), SVL (snout-vent length).

Characters

Snout. Flores & Vigle (1994) summarized the distinguishing features for nine species but failed to note that snout length varies sexually (males have shorter snouts than do females, expressed as the ratio of E-N to eye length, Table 1). Round snouts (in dorsal view) occur in *E. ptochus*, *E. suetus*, and females *E. zophus* whereas all others have subacuminate snouts (Figure 1). In male *E. zophus*, the snout appears subacuminate (Figure 1) because the tip is pointed. Flores & Vigle (1994) considered *E. librarius* to have an acuminate snout but we record its state as subacuminate.

Flores & Vigle distinguished various taxa as having round (*E. frater*, *E. incomptus*, *E. miyatai*, and *E. pecki*) versus sharp canthus rostralis (five others including *E. taeniatus*). The prominence of a canthus rostralis is difficult to quantify because in none of these taxa is there a sharp break between the plane of the top of the snout and the loreal plane. Rather, one encounters a curved surface that is more or less rounded. Among the species from the Caribbean and Pacific drainages of Colombia, only *E. ptochus*, *E. suetus*, and *E. zophus* have distinctly rounded canthi rostrali – in the other species, the canthus is more or less distinct.

Frogs can also be distinguished based on the length of the snout (short versus long) and the associated head shape (round dorsally or subacuminate) but one must take care to note sexual differences. Additionally, there are obvious differences in the sizes of the digital disks and minor (easily overlooked) differences in the tuberculation of the tarsus. Lastly, some differences in body size and proportions emerge from the study of series (some have very short hindlimbs).

Sizes of digital disks and tarsal tuberculation. Although these frogs are very similar structurally to one another, some other minor structural differences are apparent when direct comparisons are made. As noted by Lynch & Rueda-A (1999), *E. viejas* has narrower disks on the fingers than do *E. miyatai* or *E. taeniatus*. *Eleutherodactylus paisa* (named herein) is like *E. viejas* whereas the other five trans-Andean species have larger finger disks (Figure 2).

Two species (*E. ptochus* and *E. taeniatus*) lack outer tarsal tubercles (or these are very poorly developed) whereas the other five species have a series of rounded tubercles along the outer edge of the tarsus. *Eleutherodactylus suetus* and *E. zophus* (Figure 3) have a single round inner tarsal tubercle in contrast to having

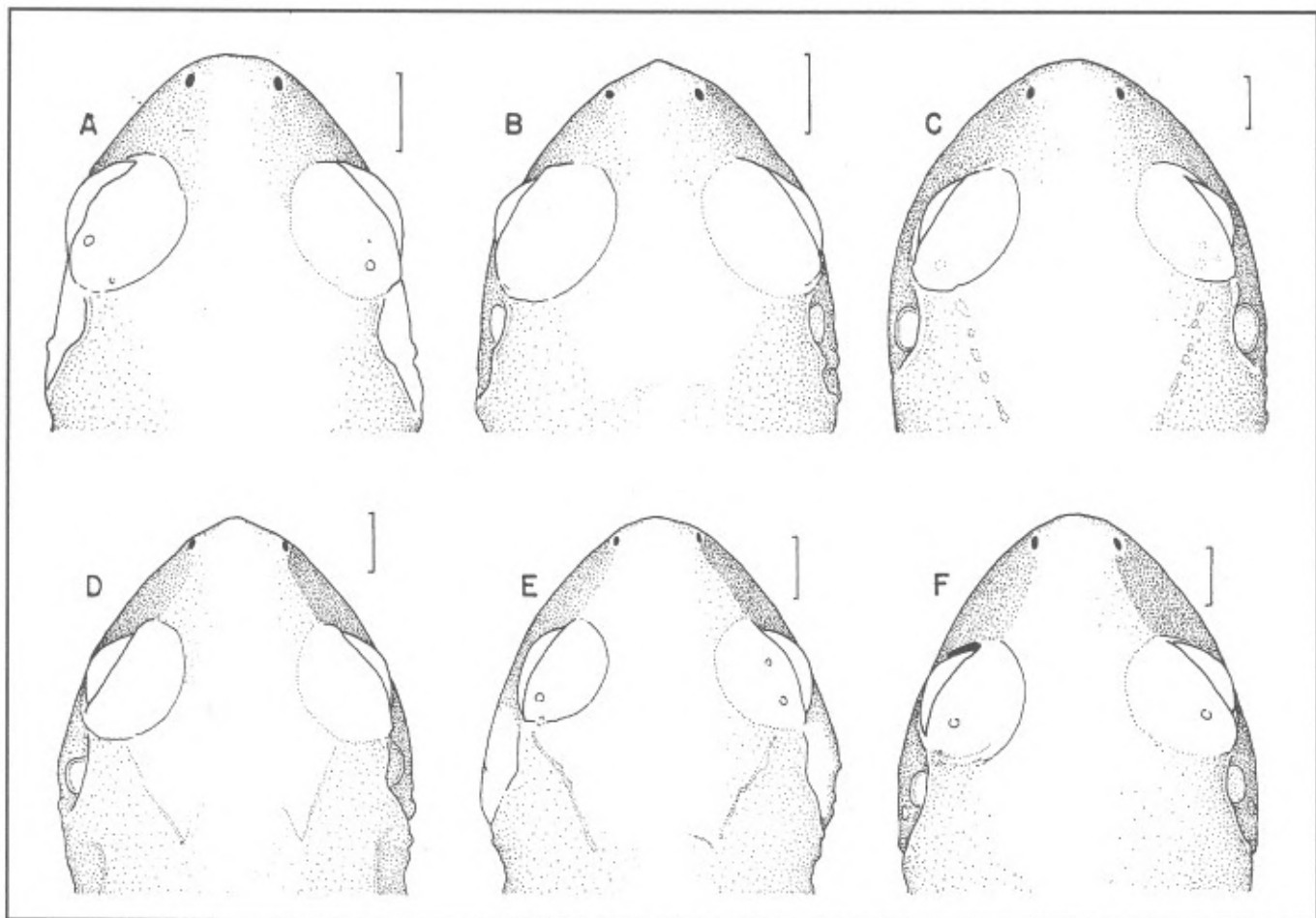


Figure 1. Dorsal views of heads of species of the *Eleutherodactylus taeniatus* complex. (A) *E. suetus*, ICN 41740, (B) *E. zophus*, male, ICN 20198, (C) *E. zophus*, female, ICN 20196, (D) *E. paisa*, ICN 9995, (E) *E. viejas*, ICN 42426, (F) *E. taeniatus*, ICN 31855. Scales equal 2 mm.

an elongated fold-like tubercle (Figure 3), the state seen in *E. miyatai*, *E. paisa*, *E. ptochus*, and *E. viejas*). *Eleutherodactylus taeniatus* differs from all of these in having two or three inner tarsal tubercles (Lynch, 1980).

Coloration: Although most of these frogs have uniformly brown posterior surfaces of the thighs (as preserved specimens), this description conceals three variations: (1) uniform brown surfaces, (2) brown surfaces but bearing small cream flecks, and (3) brown surfaces of the posterior surfaces enclosing large cream (yellow to orange in life) spots.

Sizes and proportions: Two species are small (*E. ptochus* and *E. suetus*) and each has a short snout, rounded in dorsal view. The other five species are all larger (their

largest juvenile females are the sizes of adult females of the small species) but the differences in sizes of adults of the five "large" species are not significant given the sample sizes available (Table 1). Three of the larger species differ significantly from the others in one aspect of proportions or another.

Eleutherodactylus miyatai differs from the other six species in having small tympani in females (and in lacking sexual dimorphism in tympanum size), *E. viejas* has significantly longer legs than seen in the other six species, and *E. zophus* has significantly shorter hindlegs than the other six species. In all seven, females have slightly wider heads than do males (usually significantly so) and in five species (excepting *E. miyatai* and *E. ptochus*), females

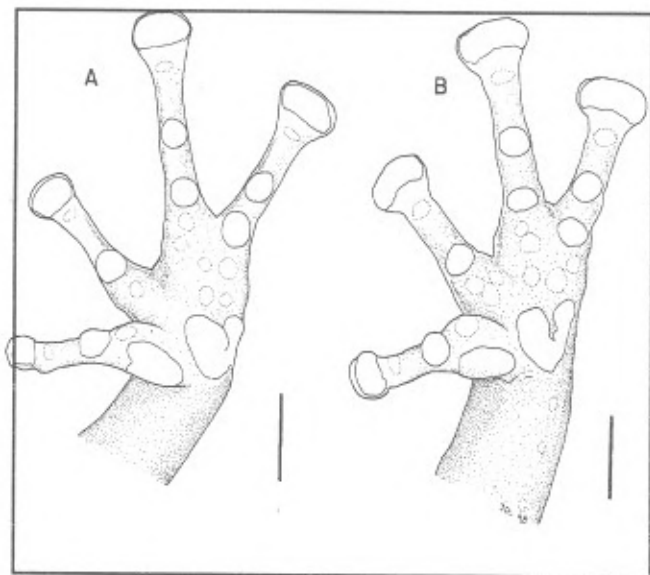


Figura 2. Palmar views of hands of *Eleutherodactylus paisa* (ICN 9993) and *E. zophus* (ICN 36046). Scales equal 2 mm.

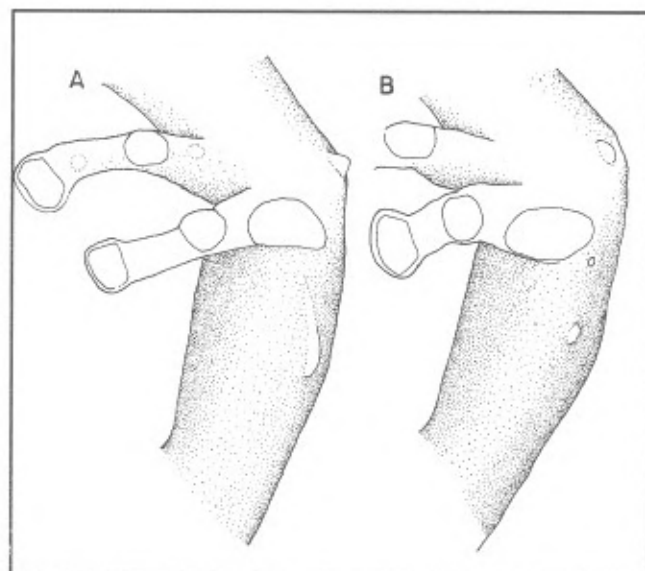


Figura 3. Ventral views of tarsi of *Eleutherodactylus paisa* and *E. zophus*.

have larger tympani than do males. The snout is longer in females than in males in all species although the differences for *E. suetus* are only marginally significant. Males usually have larger eyelid/IOD ratios than do females which we think reflects the broader IOD seen in females. However, the variances for this proportion are so great that little reliance can be placed in the "character".

Accounts of species

Eleutherodactylus miyatai Lynch

This species was described originally from the vicinity of Virolín, Santander (Lynch, 1984) but is now known to occur more widely along the western flanks of the Cordillera Oriental of Colombia at elevations between 1720 and 2440 m (Figure 4).

Eleutherodactylus paisa sp. nov.

Eleutherodactylus taeniatus (in part): Lynch, 1980: 183, 185, 187.

Holotype: Amphibian collection of the Instituto de Ciencias Naturales 9992, an adult female, one of a series collected by J. D. Lynch and P. M. Ruiz on 8 June 1981 (field number JDL 13028).

Paratopotypes: ICN 3551, ICN 9993-94 (adult females).

Type-locality: COLOMBIA, Departamento de ANTIOQUIA, municipio Medellín, north slope Cerro Padre Amaya, 6.2 km from paved road, 2670 m.

Paratypes: Males, ICN 9996-98, female, 9995 (ANTIOQUIA, Bello, Serranía Las Valdías, 6.6-8.1 km WSW San Felix, 2820-3100 m), males, ICN 43814-5, females, MHUA 62, 64, 66-67, 72 (ANTIOQUIA, Caldas, vereda La Clara, Alto San Miguel, 1800-2300 m), female, ICN 10001 (ANTIOQUIA, Sonsón, Sonsón, 2525 m), males ICN 39566-67 (ANTIOQUIA, Sonsón, vereda San Francisco y Sirgua, 2420-3100 m).

Referred specimen Antioquia, Yarumal: el Colgado-ro, Hacienda Las Convenciones (ICN 1178).

Diagnosis. (1) Skin of dorsum smooth with low tubercles laterally and posteriorly, that of venter areolate; dorsolateral folds incomplete; (2) tympanum round, not prominent, 25-43% eye length; (3) snout subacuminate in dorsal view, long; (4) upper eyelid narrower than IOD, bearing low tubercle; no cranial crests; (%) vomerine odontophores oblique; (6) males with vocal slits and nuptial pads; (7) first finger shorter than second; disks expanded, round; (8) fingers bearing lateral keels; (9) ulnar tubercles in row, not prominent; (10) nonconical tubercles on heel, outer edge of tarsus; fold-like tubercle on inner edge of tarsus; (11) two metatarsal tubercles, inner elongate, six times size of subconical outer; supernumerary plantar tubercles at bases of toes; (12) toes

bearing lateral keels, no webbing; toe disks smaller than those of outer fingers; fifth toe very long; (13) posterior surfaces of thighs uniformly brown; no white line above anal triangle; (14) adults small, males 19.9-24.2 ($x = 21.5 \pm 0.6$) mm, females 27.5-30.7 ($x = 28.9 \pm 0.6$) mm SVL.

Etymology. The specific epithet is used as a noun in apposition and is Spanish. It is given to the species because it occurs on the "altiplano" of the Departamento de Antioquia, whose inhabitants are called paisas.

Description (see table 1 for proportions). Head slightly narrower than (females) to as broad as (males, young females) body, wider than long; snout subacuminate in dorsal view, rounded in lateral profile; nostrils weakly protuberant, directed laterally; canthus rostralis relatively sharp, straight or weakly concave; loreal region weakly concave, sloping abruptly to lips; lips not flared, even in large females; low tubercle on posterior part of upper eyelid; upper eyelid narrower than

IOD; no cranial crests; supratympanic fold evident above and behind tympanum; tympanum round, not prominent, separated from eye by 1.5 times its diameter; postrectal tubercles subconical; choanae round, well median of maxillary arch; vomerine odontophores median and posterior to choanae, oblique, separated medially by distance equal width of an odontophore, each about 2/3 size of a choana, bearing 3-4 teeth in a slanted row; tongue longer than wide, posterior edge notched, posterior 2/5 not adherent to floor of mouth; males with subgular vocal sac, short vocal slits posterolateral to tongue.

Skin of dorsum nearly smooth with low tubercles, especially laterally and posteriorly; tubercles becoming larger on flanks; dorsolateral fold ill-defined, not reaching supratympanic fold nor above groin; skin of venter coarsely granular; discoidal folds well anterior to groin; no anal sheath or perianal warts; ulnar tubercles not prominent but present, decreasing in size toward elbow; palmar tubercle bifid, twice size of oval thenar; super-

Table 1. Sizes (in mm) and proportions of seven species of the *taeniatus* complex of *Eleutherodactylus* in the Caribbean and Pacific drainages of Colombia. First line provides range of values (and sample size); second line reports mean ± 1 standard error of the mean

SPECIES	SEX	SVL	SHANK/SVL	HW/SVL	EYELID/IOD	TYMP/EYE	E-N/EYE
<i>E. miyatai</i>	males	16.9-20.2 (8)	46.7-55.1 (8)	37.4-41.4 (8)	68.0-95.6 (8)	20.0-32.3 (6)	67.7-87.0 (8)
		18.2 \pm 0.4	52.0 \pm 0.9	39.8 \pm 0.4	86.5 \pm 3.4	28.0 \pm 1.8	78.4 \pm 2.5
	females	24.0-28.5 (8)	47.7-53.3 (8)	39.8-43.7 (8)	66.7-96.0 (8)	23.7-30.6 (7)	81.8-93.6 (8)
		26.1 \pm 0.5	51.1 \pm 0.6	41.8 \pm 0.6	76.9 \pm 3.5	27.5 \pm 1.0	87.0 \pm 1.4
<i>E. paisa</i>	males	19.9-24.2 (7)	43.4-53.8 (7)	37.1-39.4 (7)	80.0-100.0 (7)	25.0-37.0 (7)	77.8-89.3 (7)
		21.5 \pm 0.6	49.1 \pm 1.5	38.0 \pm 0.3	89.7 \pm 2.6	30.6 \pm 1.6	82.2 \pm 1.5
	females	27.5-30.7 (6)	47.1-49.1 (6)	37.9-40.7 (6)	69.4-81.2 (6)	31.2-42.9 (6)	94.1-100.0 (6)
		28.9 \pm 0.6	47.9 \pm 0.3	38.9 \pm 0.4	75.6 \pm 2.0	38.0 \pm 1.7	97.0 \pm 1.1
<i>E. ptochus</i>	males	16.7-19.8 (29)	45.6-52.9 (28)	35.4-38.9 (28)	68.0-100.0 (28)	23.1-41.7 (28)	69.2-91.7 (28)
		18.5 \pm 0.2	49.2 \pm 0.4	37.0 \pm 0.2	86.4 \pm 1.7	29.3 \pm 0.7	74.4 \pm 0.9
	females	20.7-25.5 (7)	46.8-54.3 (15)	36.5-40.8 (15)	69.2-100.0 (15)	15.2-37.9 (15)	72.7-81.5 (15)
		23.0 \pm 0.6	49.7 \pm 0.6	38.3 \pm 0.3	84.5 \pm 2.3	30.1 \pm 1.5	76.8 \pm 0.8
<i>E. suetus</i>	males	13.9-18.2 (26)	47.5-54.0 (19)	34.8-39.8 (19)	75.0-100.0 (19)	18.2-33.3 (19)	65.4-86.4 (19)
		16.5 \pm 0.2	49.8 \pm 0.4	37.1 \pm 0.3	88.2 \pm 1.6	27.4 \pm 1.1	75.8 \pm 1.1
	females	20.7-23.0 (10)	47.3-55.3 (12)	37.3-40.6 (12)	78.3-100.0 (12)	26.1-40.6 (12)	65.6-92.3 (12)
		22.0 \pm 0.2	50.0 \pm 0.6	39.0 \pm 0.3	88.3 \pm 2.5	33.8 \pm 1.0	80.9 \pm 2.0
<i>E. taeniatus</i>	males	15.3-22.2 (37)	50.5-59.5 (31)	35.8-41.9 (31)	72.0-100.0 (31)	26.1-40.6 (31)	73.1-100.0 (31)
		19.5 \pm 0.2	55.2 \pm 0.4	39.1 \pm 0.3	85.0 \pm 1.3	31.2 \pm 0.5	83.4 \pm 1.0
	females	23.0-31.6 (20)	49.3-57.2 (19)	38.3-42.9 (19)	65.8-111.1 (19)	29.3-41.6 (19)	82.9-100.0 (19)
		27.3 \pm 0.4	53.8 \pm 0.5	40.0 \pm 0.3	85.0 \pm 3.4	34.8 \pm 0.8	91.5 \pm 1.4
<i>E. viejas</i>	males	15.3-19.1 (9)	57.1-61.4 (9)	35.4-41.0 (9)	60.0-85.7 (9)	26.1-36.0 (9)	77.8-100.0 (9)
		17.7 \pm 0.5	58.8 \pm 0.5	39.0 \pm 0.6	73.9 \pm 3.0	29.9 \pm 1.0	86.4 \pm 2.7
	females	24.0-29.1 (11)	52.7-61.4 (15)	338.0-43.5 (15)	59.1-86.7 (15)	29.0-40.0 (15)	85.2-108.6 (15)
		26.8 \pm 0.5	57.1 \pm 0.7	40.6 \pm 0.4	73.7 \pm 2.0	32.8 \pm 0.9	97.5 \pm 1.8
<i>E. zophus</i>	males	18.7-23.0 (18)	42.7-51.4 (18)	36.4-40.5 (16)	72.0-96.0 (16)	25.9-40.0 (17)	65.5-90.9 (17)
		21.0 \pm 0.3	46.9 \pm 0.6	38.6 \pm 0.3	84.3 \pm 2.1	32.7 \pm 1.1	80.0 \pm 1.4
	females	25.5-31.2 (21)	43.3-50.6 (21)	37.7-42.3 (21)	61.1-90.3 (19)	31.2-41.2 (20)	75.7-100.0 (20)
		28.3 \pm 0.3	46.5 \pm 0.4	40.1 \pm 1.2	74.7 \pm 2.2	35.8 \pm 0.7	88.4 \pm 1.4

numerary palmar tubercles prominent; subarticular tubercles round, subconical; fingers bearing lateral keels and large round disks; first finger shorter than second; males with white nuptial pad on thumb.

Tubercle on heel nonconical; series of minute nonconical tubercles along outer edge of tarsus; fold-like tubercle on inner edge of tarsus (Figure 3); inner metatarsal tubercle three times as long as wide, about 6 times size of subconical outer metatarsal tubercle; numerous supernumerary plantar tubercles, most prominent at bases of toes; subarticular tubercles round, subconical; toes bearing lateral keels and expanded disks; disks of toes smaller than those of outer fingers; tip of toe V reaching to distal border of distal subarticular tubercle of toe IV, that of toe III reaching to distal border of penultimate subarticular tubercle of toe IV; heels overlapping when flexed hindlimbs held perpendicular to sagittal plane.

Coloration in ethanol: Pattern poorly developed. Interorbital bar, occipital W, sacral chevrons, and

suprainguinal spots (or bar) slightly darker brown than ground color. Supratympanic stripe and subocular labial bars dark brown; anal triangle dark brown, lacking cream line above vent; anterior and posterior surfaces of thighs uniform brown; venter brown with some darker blotching at tip of chin. In the small sample available, there is no pattern polymorphism.

Eleutherodactylus ptochus Lynch

Lynch (1998) described this small species from the Serranía de los Paraguas (frontier between departamentos Chocó and Valle del Cauca). Subsequently, another locality was found in adjacent Risaralda (Figure 5). This is a species from intermediate elevations (2200-2400 m) and may be the sister-species of *E. zophus*.

Eleutherodactylus suetus Lynch & Rueda-A.

Eleutherodactylus suetus is a species of intermediate elevations (1850-2780 m) thus far known only along the eastern side of the northern Cordillera Central (Lynch & Rueda, 1998). It is sympatric at one locality with *E. paisa* (Figure 5).

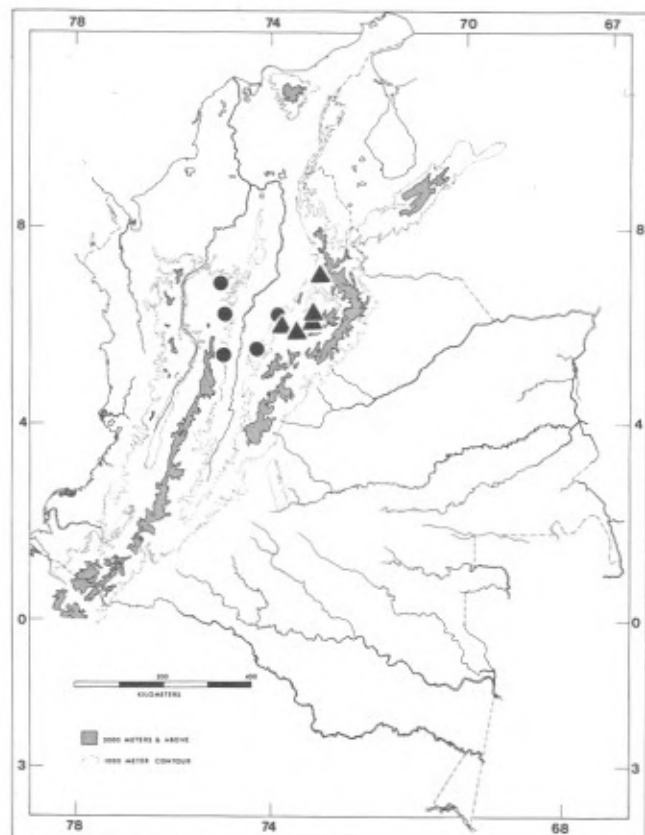


Figura 4. Distributions of two species of the *Eleutherodactylus taeniatus* complex in western Colombia. *E. miyatai* ▲ and *E. viejas* ●.

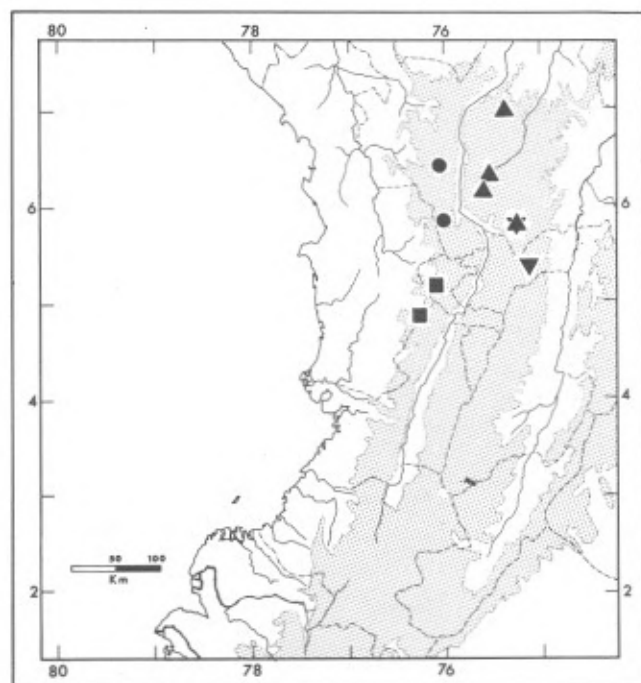


Figura 5. Distributions of four montane species of the *Eleutherodactylus taeniatus* complex in western Colombia. *E. paisa* ▲, *E. ptochus* ■, *E. suetus* ▼, and *E. zophus* ●.

Eleutherodactylus taeniatus (Boulenger)

Lynch (1980) rescued this name from oblivion and pointed out that the frog often identified as *E. ockendeni* from Panamá was this species. At the same time, **Lynch** confused specimens of *E. paisa* and *E. zophus* with *E. taeniatus*. This confusion does not affect the description given by **Lynch** but does affect his data on body size.

Although we characterize this species as a lowlands frog, it also enters moderate elevations (to about 1500 m). In the biogeographic Chocó, *E. taeniatus* is distributed from Panamá to just north of Buenaventura. The more southern record given by **Lynch** (1980) in western Ecuador represents specimens of *E. ockendeni* with incorrect locality data (**Lynch & Duellman**, 1997). *Eleutherodactylus taeniatus* also occurs across the northern foothills of the western Cordilleras and enters the Middle Magdalena. The distribution of *E. taeniatus* (Figura 6) is remarkably like that of *E. raniformis* (**Lynch & Myers**, 1983) suggesting that these two species have responded in precisely the same way to the ecological and geological changes that have shaped the isthmian bridge in spite of belonging to different subgenera, one Middle American and the other presumably South American in origin.

Eleutherodactylus viejas Lynch & Rueda-A.

This recently described species (**Lynch & Rueda-A.**, 1999) apparently is distributed in a discontinuous fashion at elevations between 565 and 1800 m (Figure 4). One system of populations is known along the eastern base of the northern part of the Cordillera Central and the other is found on the opposite side of the Magdalena valley.

Eleutherodactylus zophus sp. nov.

Eleutherodactylus taeniatus (in part): **Lynch**, 1980: 183, 185, 187 (AMNH specimens from western Antioquia).

Holotype: Amphibian collection of the Instituto de Ciencias Naturales 20149, an adult female, one of a series collected by M. C. Ardila, J. D. Lynch, P. M. Ruiz, and R. Sánchez 4 June 1988 (original field number JDL 16934).

Paratopotypes: Males, ICN 20155, 20158-61, 20164, 20170, 20173, 20187, 20197-98; females, 20151-53, 20171, 20185-86, 20189-90, 20196, 20200.

Type-locality: COLOMBIA, Departamento de ANTIOQUIA, municipio de Urrao, carretera Urrao-Caicedo, vereda El Chuscal, Quebrada "La Nevera", 2680 m.s.n.m.

Paratypes: ICN 20148 (ANTIOQUIA, límite entre municipios Caicedo and Urrao, "Alto de Caicedo", 2700-2740 m), 20141, 20144, 20147 (ANTIOQUIA, Urrao: 15.7 km by road from Urrao, Qda. La Nevera, 2430 m), 41670-82 (ANTIOQUIA, Betania: vereda Piedra Alta, Hda. Agua Linda, 5° 44' N, 76° 01' W, 2030-2200 m).

Referred specimens (juveniles and poorly-preserved specimens). Topotypes (ICN 20150, 20154, 20156-57, 20162-63, 20165-69, 20172, 20174-84, 20188, 20191-95, 20199). **Antioquia**, Andes (AMNH 14091, 14095). Urrao: El Chuscal (ICN 1208-13, 1215-16, 1219, 1227), La Nevera, 2560 m (ICN 1179, 1182, 1187, 1189, 3499), 15.7 km by road from Urrao, 2430 m (ICN 20142-43, 20145-46).

Etymology. Greek, *zophus*, meaning darkness or gloom. The name is used in reference to the drab coloration of this small frog and in reference to its habit of becoming very active soon after sunset.

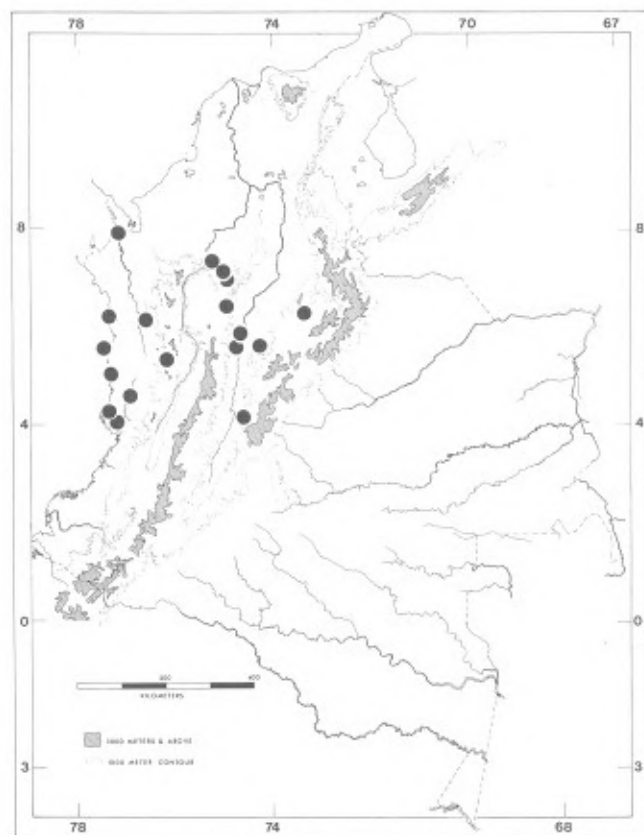


Figura 6. Distribution of *Eleutherodactylus taeniatus* in western Colombia. Specimens examined

Diagnosis. (1) Skin of dorsum smooth except for flattened warts associated with color pattern, that of venter areolate; no dorsolateral folds; (2) tympanum round, 26-41% eye length; (3) snout subacuminate in dorsal view in males, round in females, short; (4) upper eyelid narrower than IOD, bearing low warts; no cranial crests; (5) vomerine odontophores low, oval; (6) males with vocal slits and nuptial pads; (7) first finger shorter than second; digital disks expanded, round; (8) fingers bearing lateral keels; (9) row of ulnar tubercles present; (10) nonconical tubercles on heel, outer edge of tarsus, one on inner edge of tarsus; (11) two metatarsal tubercles, inner oval, ca six times size of subconical outer; numerous supernumerary plantar tubercles; (12) toes bearing lateral keels, no webbing; toe disks as large as those of outer fingers; fifth toe very long; (13) dorsum brown with darker brown markings; venter brown; posterior surfaces of thighs brown with cream flecks; (14) adults small, males 18.7-23.0 ($x = 21.0 \pm 0.3$) mm, females 25.5-31.2 ($x = 28.3 \pm 0.3$) mm SVL.

Eleutherodactylus zophus is most similar to *E. ptochus* but is larger than *E. ptochus* (males 16.7-19.8, $x = 18.5 \pm 0.2$, females 20.7-25.5, $x = 23.0 \pm 0.6$ mm SVL) with shorter legs (*E. zophus* shank/SVL 46.9 \pm 0.6 in males, 46.5 \pm 0.4 in females versus *E. ptochus* 49.2 \pm 0.4 in males, 49.7 \pm 0.6 in females), a larger tympanum, and longer snout. Additionally, the skin of the dorsum in *E. zophus* bears more prominent warts than that of *E. ptochus* (nearly smooth), males of *E. zophus* have a subacuminate, not round, snout in dorsal view, *E. zophus* has lateral keels on the fingers, ulnar tubercles, and small tubercles on the heel and outer edge of the tarsus. In *E. zophus*, the anal triangle is not bordered above by a cream line.

Description (see table 1 for proportions). Head as broad as body in males, narrower than body in adult females; head broader than long; snout of males weakly subacuminate in dorsal view, of females round, in lateral view rounded in each; nostrils very slightly protuberant, directed dorsolaterally; canthus rostralis round in females, slightly more evident in males, concave; snout short; loreal region weakly concave, sloping to upper lip; lips weakly flared in females; upper eyelid bearing few low tubercles; no cranial crests; supratympanic fold evident above and behind tympanum; tympanum round; tympanum separated from eye by distance equal its diameter; postrectal tubercles subconical; choanae small, round, well median of palatal shelf of maxillary arch; vomerine odontophores median and posterior to choanae, low, oval, slanted, separated medially by distance equal one-half width of an odontophore, each bearing 2-3 teeth;

odontophores smaller in males than in females, in females slightly larger than a choana; tongue longer than wide, its posterior border notched, posterior 2/5 not adherent to floor of mouth; vocal slits posterolateral to tongue; vocal sac subglular.

Dorsum smooth except for warts associated with color pattern and continuing onto flanks; no dorsolateral folds; skin of limbs bearing warts in dark markings; venter coarsely areolate; discoidal fold evident, just anterior to groin; no anal sheath; pair of subanal tubercles; ulnar tubercles forming row, diminishing in size from antebrachial tubercle; palmar tubercle bifid, occasionally divided, twice size of oval thenar tubercle; supernumerary palmar tubercles numerous; subarticular tubercles round, nonconical; fingers bearing lateral keels and round disks; disks about twice as wide as digit below disk except on thumb; disk of thumb obviously expanded; first finger shorter than second; large white nuptial pad on thumb in males.

Nonconical tubercle on heel with row of smaller tubercles along outer edge of tarsus; one tubercle on distal 1/4 of inner edge of tarsus, sometimes with smaller tubercles proximal and distal to it; inner metatarsal tubercle twice as long as wide, about six times size of subconical outer; numerous supernumerary plantar tubercles; subarticular tubercles round, nonconical; toes bearing lateral keels but no webbing; disks of toes as large as those of outer fingers, round; tip of III reaches distal edge of penultimate subarticular tubercle of toe IV, tip of V to distal edge of distal subarticular tubercle of toe IV; hindlimbs short, heels touching or nearly touching when flexed hindlimbs held perpendicular to sagittal plane.

Coloration in ethanol. Dorsum brown with darker brown ill-defined scapular and sacral chevrons and suprainguinal spots; limb bars about equal in width to interspaces, more or less transverse on shanks; posterior surfaces of thighs brown with cream flecks; groin and anterior surfaces of thighs uniform brown; supratympanic stripe and labial bars brown, edged with cream.

Coloration in life. "Venters all dark brown as are concealed surfaces of limbs. Dorsum varies greatly in ground color: one is pale cream-gray; most are brown; another has much rust color scattered on dorsum. Green enters dorsum of several. Iris gray with black reticulation and hint of reddish horizontal streak." (fieldnotes JDL, 4 June 1988). "Iris is either very pale green or pale brassy color above with red horizontal streak and gray below, all reticulate with black. Concealed thigh, groin brown

with cream flecks. Venter brown (somewhat more dirty yellow with brown stipple in larger females). Dorsum colored with browns (yellowish brown to reddish brown). Some have dorsoconcolor type pattern with very dark flanks." (fieldnotes, JDL, 16 June 1997).

Measurements of holotype in mm. SVL 29.0, shank 13.5, HW 11.4, head length 10.4, chord of head length 11.4, upper eyelid width 2.5, IOD 3.5, tympanum length 1.3, eye length 3.2, E-N 3.0.

Natural history. In the vicinity of the type-locality in June 1988, *E. zophus* was found on vegetation within the forest as well as along the forest-edge and on low vegetation in the bed of the quebrada La Nevera. The call was described as a "series of musical bonks (banging bamboo stick together)." Males called from the tops of leaves with the body elevated off the surface of the leaf. Males called sporadically the night of 16 June 1997 in municipio Betania in the forest at 2030-2200 m. All were found on very low vegetation within 20 cm of the forest floor in dense forest (none was found along the forest edge or in the pastures).

Females smaller than 24.5 mm are juveniles (straight oviducts with no thickening, small ovarian eggs) except for ICN 20148 (24.0 mm SVL) which has some convolutions of her oviducts and is scored as a young female. Males smaller than 18.5 mm SVL do not have nuptial pads and were not calling.

Distribution: Known only from two localities (2030-2680 m) in the northern part of the Cordillera Occidental of Colombia (Figura 5).

Specimens examined

Eleutherodactylus miyatai.

Boyacá: Moniquirá: Km 21, carretera Barbosa-Arcabuco, 15 km W Arcabuco, 2440 m (ICN 29922). Toquí: Finca Versalles, 1720 m (ICN 38738). **Santander:** Bolívar: corregimiento La Hermosura, Km 3 carretera Hermosura - Puerta de Los Cerros, 1800 m (ICN 39108-20). Charalá: vereda Virolín, Cañaverales, 1770 m (ICN 22476-77), Cerro del Fara (ICN 5448-49), carretera a El Reloj, 1740 m (ICN 5165), Río Luisito, 1750 m (ICN 12399), cabeceras Río Luisito, 1750 m (ICN 6184, 8527). Gambita: Km 55-56, carretera Duitama-Charalá, Bogotacito, 2400 m (ICN 12490-92). Tona: Km 22, carretera Bucaramanga-Pamplona, Finca El Diviso, 1890-2050 m (ICN 15266-82).

Eleutherodactylus ptochus.

Chocó: San José del Palmar: 20.5-22.5 km del cementario de El Cairo, 2080-2200 m (ICN 38772-79, 39826-27) **Risaralda:** Apía: sector "Colgaderos" (ICN 31290). **Valle del Cauca:** El Cairo: vereda Las Amarillas, 2100-2200 m (ICN 39780-825), Cerro Ingles (UVC 9155-60).

Eleutherodactylus suetus

Antioquia: Sonsón: 8 km E (por carretera) Sonsón, 2780 m (ICN 10002). **Caldas:** Pensilvania: transecto altitudinal desde Km 18 hacia Km 28 de la carretera Pensilvania-Arboleda, 2000-2650 m (ICN 41748). **Samaná:** corregimiento de Florencia, El Estadero, 1850-1950 m (ICN 41698-746, 41747, 41749).

Eleutherodactylus taeniatus

Antioquia: Amalfí: vereda El Mango, Quebrada El Caiman, 1200 m (MHUA 742), vereda La Guyana, 1400 m (MHUA 597, 677-86). Anorí: alto de los Tauros, 700 m (ICN 43654). Puerto Arquia: Río Arquia, Belén (LACM 46883), Finca Chiribiquí (LACM 46884). Puerto Triunfo: Qda. Las Mercedes, 500 m (ICN 39561-65.). Valdivia: Puerto Valdivia, vereda La China, 800 m (MHUA 393). Yolombo: Bosque Normandia, Quebrada Guaduas, 1000 m (MHUA 671). **Caldas:** La Victoria: vereda Cañaveral, finca "La Cuba", Qda. La Juanita, 1100 m (ICN 42403-05). **Samaná:** corregimiento Norcasia, campamento El Diamante (proyecto Miel I), 520-620 m (ICN 41178-91, 41196-98, 42414), Km 23, carretera La Victoria - Samaná, campamento La Miel II, cerca la desembocadura Qda. Tasajos en la Río de la Miel, 700-880 m (ICN 41192-95, 41199-202, 42400); carretera Samaná a La Cristalina, Km 5.8-7.0, 1430-1500 m (ICN 42397-99); carretera Samaná a Florencia, Km 4.4, La Palma, 1385 m (ICN 42406-08); carretera Samaná a vereda California Alta, Km 1.6-3.0 (ICN 42401-02). **Chocó:** Boyajá: hills near upper Río Napapí (LACM 46885-93); Camino de Yupe, 350-400 m (LACM 73206-08), 420-625 m (LACM 73209, 73211-12, 73214-24), 420-720 m (LACM 73225); upper Río Opogodó above Río Merendó (LACM 46894-95); Serranía de Baudó, ridges paralleling Río Yupe (LACM 46896-902), camino de Yupe, entre alto Río Opogodó y alto Río Domingadó (ICN 565). Ciudad Mutis: Alto de Buey, N slope, 420-1070 m (LACM 47231-32, 47229); Nuquí: Estación Biologica Amargal, 100-300 m (MHUA 363-64). **Docordó:** Quebrada Docordó, 10 km above boca del Río San Juan, 120 m (AMNH 87120-21). **Istmina:** Noanamá, Río San Juan (BM 1947.2.16.99); Quebrada Vicordó, 10 km above Noanamá, 80-110 m

(AMNH 87111-12, 87116-19). Pizarro: Pizarro (CMNH 44074). Río Sucio: Parque Nacional Natural Kátios, Alto El Limón, 500 m (IAvH 1969-70), vereda Sautata (IAvH 2252). **Cundinamarca**: Yacopí: Inspección de Policía Guadalito, hacia Guadalito, Río Aldana, 1050 m (PR 16356, 16365-66), vereda Cabo Verde, 1100 m (PR 16454-55, Quebrada La Fortuna (PR 16413-14), vereda Sardinas, finca Matacaña, 1120 m (PR 16424), via vereda Pasurcha, ca. cementario (PR 16355).

Risaralda: Mistrató: sector Puerto de Oro, 900-1200 m (ICN 31855). **Tolima**: Icononzo y alrededores (ICN 43323-24). **Valle del Cauca**: Buenaventura: Bahía Málaga (UVC 8918).

Eleutherodactylus viejas

Antioquia: Amalfí: vereda El Jardín, bosque Quebradoncita, 1100 m (MHUA 453). Guatapé: vereda Santa Rita, Hda. Montepinar, 1840 m (ICN xxxxxx [jdl 21374-75]). San Carlos: carretera San Carlos a vereda Patio Bonito, Hda. Las Vegas, 1180 m (ICN 32426-44). San Rafael: bosque San Rafael (ICN 42436-40, 42446). **Caldas**: Samaná: Km 23, carretera La Victoria a Samaná, quebrada Tasajos con Río La Miel, 700 m (ICN 42409-10), carretera Samaná a Florencia, Km 1.7, 1375 m (ICN 42412-13), carretera Samaná a vereda California alta, Km 1.6-3.0 (ICN 42411). **Cundinamarca**: Yacopí: Inspección de Policía de Guadalito (ICN 42992), Cerro Colorado, 1190 m (ICN 42987), 1502 m (ICN 42980-81); vereda Barbascales, finca Montebello, 820 m (ICN 42983-84, 42991, 43003); vereda Sardinas, finca Matecaña, 1100-1120 m (ICN 42982, 42988-90, 42998-99). **Santander**: Landázuri: Km 19 [de] Cimitarra – Escuela La Esperanza, vereda El Azufrado, Qda. Torova, 565 m (ICN 39123).

Discussion

Although we can not identify synapomorphies for this assembly (the *E. frater* group) nor for the trans-Andean species, our suspicion is that each component is monophyletic. If they represent a monophyletic group, the pattern of distribution is largely consistent with allopatric models of speciation except that *E. taeniatus* and *E. viejas* are sympatric at several localities along the edges of the Middle Magdalena.

Acknowledgments

For companionship during field work over the past twenty years while we collected these frogs, we thank Pablo Bernal (q.e.p.d.), John Jairo Estrada, Ruth Estupiñán, Jeannette Nieto, Juan Manuel Rengifo, Vicente Rueda, Pedro M. Ruiz (q.e.p.d.), Ricardo Sánchez, Marco Antonio Serna (q.e.p.d.), and Claudia Vélez. Mariela Osorno contributed material collected by her during her thesis research in eastern Antioquia. We thank Fernando Castro, Charles W. Myers, Janet Muñoz, Vivian Páez, Harold Voris, and John Wright for granting access to museum specimens reported herein.

Literature cited

- Flores, G. & G. O. Vigle. 1994. A new species of *Eleutherodactylus* (Anura: Leptodactylidae) from the lowland rainforests of Amazonian Ecuador, with notes on the *Eleutherodactylus frater* assembly. *Journal of Herpetology* 28: 416-424.
- Lynch, J. D. 1980. Systematic status and distribution of some poorly-known frogs of the genus *Eleutherodactylus* from the chochoan lowlands of South America. *Herpetologica* 36: 175-189.
- _____. 1984. New frogs (Leptodactylidae: *Eleutherodactylus*) from cloud forest of the northern Cordillera Oriental, Colombia. *Contributions in Biology & Geology, Milwaukee Public Museum* (60): 1-19.
- _____. 1998. New species of *Eleutherodactylus* from the Cordillera Occidental of western Colombia with a synopsis of the distributions of species in western Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 22 (82): 117-148.
- Lynch, J. D. & W. E. Duellman. 1997. Frogs of the genus *Eleutherodactylus* (Leptodactylidae) in western Ecuador: Systematics, ecology, and biogeography. *The University of Kansas Natural History Museum, Special Publication* (23): ii + 236 p.
- _____. & C. W. Myers. 1983. Frogs of the *fitzingeri* group of *Eleutherodactylus* in eastern Panama and Chochoan South America (Leptodactylidae). *Bulletin of the American Museum of Natural History* 175: 481-572.
- _____. & J. V. Rueda-Almonacid. 1998. New frogs of the genus *Eleutherodactylus* from the eastern flank of the northern Cordillera Central. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 22 (85): 561-579.
- _____. 1999. New species of frogs from low and moderate elevations from the Caldas transect of the eastern flank of the Cordillera Central. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 23 (87): 307-314.

LAS DROGAS LIPOSOMALES

por

Eduardo A. Castro*

Resumen

Castro, E.: Las drogas liposomales: Rev. Acad. Colomb. Cienc. **23**(89): 625-634, 1999. ISSN 0370-3908.

En este artículo de actualización y divulgación científica se brinda un panorama de los últimos desarrollos en la investigación y las aplicaciones de las drogas liposomales. Esta clase de complejos permite que la descarga de las sustancias activas se efectúe en forma direccionalizada sobre el sitio deseado, minimizando así los efectos laterales nocivos que muchas veces no permiten el uso y/o la concentración necesaria de las drogas.

Finalmente se analizan algunas posibilidades de interés en el terreno de la terapia genética.

Palabras clave: Drogas liposomales.

Abstract

Liposomal drugs permit the release of active substances that act in directed form on a desired site, minimizing side effects.

Key words: Liposomal drugs.

Introducción

En 1997 la Administración de Alimentos y Drogas (FDA) de los Estados Unidos de Norteamérica brindó la aprobación comercial para que las drogas anticancerígenas encapsuladas en liposomas y una forma liposomal de una potente droga antihongos para uso en seres humanos pudieran expenderse en el circuito co-

mercial normal. Estas acciones marcan la emergencia de los liposomas como una aproximación práctica a la liberación farmacéutica dirigida. Los sistemas de liberación liposomáticos también han sido aprobados en varios países europeos. Estos resultados exitosos acaecen luego de 30 años de alternancias entre la euforia y la desesperación, entre los conceptos excitantes y los retrocesos experimentales.

De hecho, los liposomas han estado comercialmente disponibles como sistemas de liberación de drogas desde 1990. La primera licencia para un producto se aceptó en Irlanda para la formulación liposomal del agente

* CEQUINOR y Laboratorio LADECOR, Departamento de Química, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata, C.C. 962, 1900 La Plata, Argentina. E-mail: castro@nahuel.biol.unlp.edu.ar.

antifúngica *amphotericin B*. Este producto ahora está aprobado en 29 países para el tratamiento de infecciones fúngicas sistémicas de carácter severo. Los efectos laterales tóxicos del tratamiento convencional en la *amphotericin B*, que incluyen fiebre, náusea, escalofrío y daño al hígado con peligro de vida, se han atenuado marcadamente en la formulación liposomal de la misma dosis. Otros productos con base lipídica de la *amphotericin B* no-liposomal también han obtenido la aprobación comercial tan europea como de parte de la FDA.

Estructura del liposoma

Los liposomas son estructuras sintéticas de tipo celular formadas por fosfolípidos, que son los bloques de construcción molecular básica de las membranas celulares¹⁻². Los fosfolípidos consisten de un esqueleto con tres átomos de carbono con un grupo polar hidrofílico, tal como la *fosfocolina*, típicamente unido a un carbono terminal. Un par de ácidos grasos que constituyen las cadenas laterales, se encuentran ligados a los otros dos átomos de carbono (Figura 1). Estas cadenas laterales de ácidos grasos pueden tener distinta extensión y pueden contener enlaces dobles y átomos diferentes al carbono. Varias estructuras de este tipo se encuentran en la naturaleza.

Cuando las moléculas anfifílicas, tales como los fosfolípidos, se mezclan con agua, espontáneamente se reorganizan en estructuras bien definidas. En uno de los reagrupamientos usuales, los grupos extremos polares interactúan con el agua y las cadenas laterales (ácidos grasos) lo hacen con sus homólogas de otras moléculas fosfolípídicas para formar bicapas de tipo membranar. Estas bicapas forman barreras permeables a las moléculas polares en tanto que las moléculas dentro de la bicapa mantienen una considerable flexibilidad y movilidad lateral. Algunas proteínas, glicoproteínas, glicolípidos y otras moléculas anfifílicas se pueden incorporar a estas estructuras bicápicas, asemejándose a la extensa complejidad encontrada en las membranas celulares.

En el año 1965 se describieron una variedad de morfologías de capas fosfolípídicas, incluyendo estructuras cerradas que se formaron por la simple vía de mezclar fosfolípidos y agua³. La más común de estas estructuras contenían muchas capas bimoleculares concéntricas y cerradas de fosfolípidos, cada una de ellas separadas por un compartimento acuoso. Estas estructuras cerradas recibieron la denominación de "*liposomas*"⁴. Los fosfolípidos hidratados con agua en exceso y luego sometidos a un esfuerzo intenso por medio de una sonda ultrasónica o a una homogenización, pueden formar vesículas esféricas, cerradas y del tipo morfológico de concha que contiene un

volumen acuoso encapsulado y protegido de la bicapa fosfolípídica exterior. Estos liposomas son pequeños, típicamente de unos 100 nm de diámetro y de aproximadamente 1/10 de extensión de la mayor parte de las células⁵.

Como los liposomas están constituidos por las mismas moléculas que las membranas celulares vivientes, ellas son vehículos potencialmente ideales para la liberación dirigida de drogas. Es probable que ellas desencadenen fuertes reacciones inmunes, y cuando se degraden, sus componentes sean indistinguibles de los lípidos normalmente hallados en el cuerpo viviente. Como los liposomas son más pequeños que las células rojas de la sangre circulante, ellas se pueden inyectar fácilmente, aunque son lo suficientemente extensas como para encapsular una gran variedad de moléculas, ya sea en su centro acuoso o en la membrana lipídica. Además, las vesículas multilaminares proveen de otro vehículo para

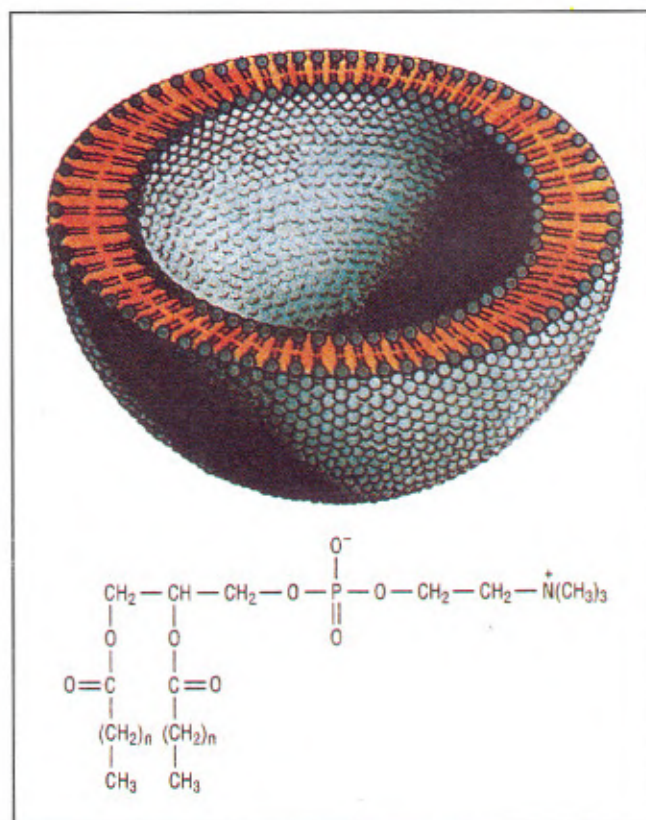


Figura 1. Las moléculas de los fosfolípidos son los constituyentes primarios de los liposomas. Los mismos consisten de un fosfato hidrofílico, conteniendo un grupo cabezal (mostrado en azul), unido a través de un esqueleto de glicerol y uniones ésteres a dos cadenas hidrocarbonadas hidrofóbicas (indicadas en color rojo). También se muestra la estructura de un fosfolípido ampliamente empleado en los liposomas (dipalmitoilfosfatidilcolina, n=14).

una descarga sostenida de las drogas. Las moléculas de drogas encapsuladas en los espacios acuosos entre cada una de las bicapas se liberan lentamente, a medida que la estructura de multicapas se degrada.

Los descubrimientos originales sobre las estructuras liposomales fueron transformados rápidamente en realidades comerciales. Así, en el año 1972 se publicó un trabajo sobre el desarrollo del concepto de emplear liposomas conteniendo enzimas para tratar enfermedades de reservas resultantes de desórdenes metabólicos congénitos ⁶. Con base en los resultados encontrados se infirió que los liposomas podían llegar a constituir un vehículo promisorio para administrar las enzimas a los pacientes. Más tarde se investigó el destino de los liposomas que contenían suero de albúmina humana radiomarcada en tres pacientes de cáncer ⁷. Se constató que en la mayoría de los órganos, la radiactividad parecía ser absorbida preferencialmente por los tejidos malignos. Estos hallazgos ofrecieron un fuerte apoyo al uso de los liposomas como transportadores de drogas en la quimioterapia de cáncer.

Otros trabajos se concentraron en la biodistribución de los liposomas y la forma de interactuar con las células, incluyendo ejemplos de toxicidad selectiva. Así, por ejemplo, se demostró que cuando los anticuerpos producidos por conejos en respuesta a la inmunización contra las células de glóbulos rojos estaban enlazados en forma covalente a la superficie de los liposomas, la unión de aquellos liposomas a los glóbulos rojos humanos *in vitro* aumentaba por un factor 200 respecto de los liposomas sin modificación ⁸. También se siguió el destino intracelular de varias sondas fluorescentes y oro coloidal atrapado en liposomas *in vitro* cargadas negativamente ⁹. Los liposomas cargados fueron tragados por las células y la rotura de los liposomas en el entorno ácido y rico en enzimas de la vesícula endocítica (antes que la fusión del liposoma) permitió que las moléculas atrapadas en el liposoma pudieran escapar hacia el citoplasma.

Suministrando estabilidad

Los investigadores involucrados en las primeras etapas de la investigación sobre este tema prontamente se dieron cuenta que los liposomas no eran simples curiosidades de laboratorio o útiles modelos de estructuras membranales y que podían servir de base para una poderosa tecnología de suministro de drogas. Sin embargo, primero se debían vencer tres serias dificultades antes que se llegara a concretar todo el potencial de los liposomas como vehículos transportadores de drogas. En

primer lugar, tenían que ser formulados los liposomas que debían mantener su integridad física en la corriente sanguínea y retener sus contenidos. En segundo término, como cuerpos extraños en el sistema circulatorio, es esperable que los liposomas puedan ser expulsados eficientemente por las células fagocíticas localizadas en el hígado, el bazo y otros órganos. Si los liposomas habrán de ser útiles como vehículos liberadores de drogas, deberían alcanzar los sitios destinados a tales efectos en el cuerpo antes que los fagocitos las eliminen. Finalmente, se necesitan métodos eficientes para encapsular a las drogas en los liposomas.

Hacia fines de la década del 70 se usó una técnica denominada “**espectroscopía de correlación angular perturbada de rayos gama**” (g-PAC) ¹⁰⁻¹¹ para determinar la integridad de los liposomas en vivo en ratones. En un experimento de g-PAC, un radioisótopo tal como el ¹¹¹In³⁺ decae con la emisión en cascada de dos rayos gama ¹². La gráfica del número de eventos coincidentes versus el ángulo entre los detectores de la emisión de los dos rayos gama se llama la “**correlación angular**”. Esta correlación puede ser perturbada si el núcleo radiactivo está unido a una molécula que puede modificar su orientación en solución.

Cuando el ¹¹¹In³⁺ se encapsula en el interior de un liposoma y luego se inyecta en un ratón, el ¹¹¹In³⁺ puede voltearse libremente en el espacio interior acuoso del liposoma en tanto que la estructura liposomal permanece intacta. Sin embargo, cuando el liposoma se degrada y el ¹¹¹In³⁺ se libera, el isótopo se puede unir a proteínas de alto peso molecular en el torrente sanguíneo, causando un cambio en el tiempo de volteado rotacional del isótopo, lo cual es detectado directamente por la g-PAC ^{10,11}. Con el uso del marcador radiactivo es posible determinar no sólo hacia donde se dirige el liposoma sino también su integridad en la sangre o en cualquier otro tejido del animal. El empleo de esta técnica permitió demostrar que los liposomas formulados con técnicas que eran usuales en los 70 se desintegran rápidamente en la presencia de suero o *in vivo* ¹⁰⁻¹¹.

El método g-PAC permitió determinar en forma rápida el destino de varias formulaciones liposomales en animales experimentales. Así, por ejemplo, los liposomas compuestos por dos componentes comunes de las membranas celulares —el disteroifosfatidil colina (DsPC; un fosfolípido con cadenas laterales de un ácido graso saturado que contiene 18 átomos de carbono) y el colesterol— mostraron una buena estabilidad *in vivo* y largos tiempos de circulación ¹⁰⁻¹¹. En cambio, los liposomas compues-

tos por el dipalmitoilfosfatidil colina (DPPC, un fosfolípido con cadenas laterales de un ácido graso saturado con 16 átomos de carbono) y el colesterol, eran eliminados mucha más rápidamente en la solución. Estas observaciones se explicaron mostrando que las interacciones de las membranas liposomales con las proteínas plasmáticas podrían aumentar la captura de los liposomas por los fagocitos¹³. Los experimentos de g-PAC mostraron que este proceso, denominado "*opsonización*" se puede minimizar formulando a los liposomas a partir de fosfolípidos bien caracterizados con un contenido de cadenas laterales extensas de ácidos grasos saturados.

Otra forma de reducir la eliminación de los liposomas por los fagocitos se descubrió en el año 1987¹⁴. Se constató que adhiriendo a la superficie del liposoma sustancias hidrofílicas tales como los gangliósidos se reduce la velocidad de degradación de los liposomas por las células fagocíticas en el hígado y el bazo. Posteriormente, otros grupos demostraron que el polietilenglicol (PEG) suministra una barrera al proceso de opsonización que puede aumentar significativamente el tiempo de vida de circulación de un liposoma¹⁵. Los liposomas sintetizados con fosfolípidos tales como el DSPC y el colesterol circulan por períodos extensos sin el PEG ya que la bicapa fuertemente empaquetada que se forma con estos materiales resiste substancialmente la opsonización.

Captación rígida

Los investigadores comenzaron a considerar tempranamente la posibilidad de modificar la superficie liposomal para mejorar la captura por tumores y otros blancos de interés médico, aún antes de que se demostrara que los liposomas que mostraban reproducibilidad *in vivo* se podían preparar.

Las membranas celulares tienen muchas moléculas funcionalmente activas sobre sus superficies, incluyendo proteínas, glicoproteínas y glicolípidos. Las secuencias detalladas de los carbohidratos y las proteínas componentes de estas moléculas juegan un papel central en la actividad biológica de la célula. Adosando en forma covalente estas moléculas a la superficie liposomal se puede esperar que la actividad y la distribución biológica se afecte significativamente *in vivo*. Esta aproximación se estudió¹⁶ uniendo anticuerpos monoclonales a los liposomas para acrecentar la captura en células que expresan antígenos específicos. El uso de anticuerpos sigue constituyendo una opción de focalización atractiva.

También se ha explorado la modificación de la superficie liposomal con oligosacáridos¹⁷⁻¹⁸. Se usó un eslabón químico consistente en una secuencia de átomos de carbono para unir uno o varios azúcares al colesterol. Se situó a un átomo de azufre entre el eslabón y los azúcares para neutralizar a las enzimas que podían cortar la unión de los azúcares al eslabón. La porción de colesterol se incorpora fácilmente en la parte hidrofóbica de la bicapa liposómica, dejando a la secuencia de azúcares expuesta sobre la superficie del liposoma. De tal forma, los liposomas fueron atrapados por las células tumorales en los cultivos.

Sin embargo, cuando estos liposomas fueron inyectados por vía intravenosa en ratones con tumores, las modificaciones químicas generaron un aumento manifiesto en la velocidad de remoción de la circulación de los liposomas modificados, o sea el efecto inverso al buscado. En estudios realizados a principios de la década del 80 se encontró que, contrariando expectativas previas, los liposomas sin modificación superficial alguna eran los más eficientes para el tratamiento tumoral *in vivo*. Investigaciones cuidadosas acerca de la distribución de liposomas marcados con ¹¹¹In³⁺ mostraron que la relación de captura de los liposomas en los tumores comparadas con otros sitios, tal como el hígado, era muy sensible a las dimensiones liposomales. Los liposomas pequeños de medidas uniformes mostraban mayor posibilidad de acumularse en los tumores.

Varios caminos posibles compiten para la captura y degradación de los liposomas. Pueden ser capturados por las *células de Kupffer*, que son células fagocíticas halladas en los principales vasos sanguíneos y en las sinusoides del hígado. La velocidad de ingestión aumenta marcadamente cuando crecen las dimensiones de la partícula. Si los liposomas son suficientemente pequeños, entonces pueden pasar a través de los poros de filtración (llamados "*fenestraciones*") en las células endoteliales que constituyen las paredes de los vasos sanguíneos del hígado. Luego son capturadas por los hepatocitos, las principales células del hígado. Entonces, la minimización de la captación por el hígado requiere partículas lo suficientemente pequeñas como para poder escapar a las células de Kupffer, pero bastante grandes a fin de pasar a través de las fenestraciones. Un interesante estudio de micrografía electrónica sobre las fenestraciones en las sinusoides del hígado suministró la información necesaria para balancear estos dos requerimientos¹⁹. Así, se encontró que la máxima dimensión era ~ 100 nm. En la práctica, los liposomas del orden de los 40-80 nm mues-

tran la mínima velocidad de remoción desde el torrente sanguíneo.

Normalmente, los capilares sanguíneos son permeables solamente a pequeñas moléculas tales como el agua o la glucosa. Sin embargo, un tumor en rápido crecimiento descarga factores angiogénicos que inducen a su vez el crecimiento veloz de los capilares dentro del tumor, trayendo oxígeno y nutrientes. Cuanto más rápidamente se construyen estos capilares, menos perfecta resulta su arquitectura y así se generan espacios entre las células endoteliales que son lo suficientemente grandes como para que aún los liposomas de 40 a 80 nm puedan pasar a través. La optimización de las medidas del liposoma y su generación con suficiente robustez y estabilidad estructural, hace posible dirigir su biodistribución de manera significativa a favor de los tumores. Estos estudios significaron un descubrimiento valioso acerca de la estructura vascular de los tumores²⁰⁻²¹. Además, ellos suministraron un mecanismo general que explica la localización de los liposomas en los tumores en rápido crecimiento.

El cargado de los liposomas con las drogas

La eficiente encapsulación dentro de los liposomas es muy importante para muchas drogas tanto por razones económicas como por motivos de seguridad. La encapsulación adecuada demanda métodos prácticos para aumentar la concentración de la droga dentro de los liposomas. Los métodos de cargado activo conducen a las moléculas a través de la bicapa a fin de aumentar la concentración interna. En el año 1976 se demostró que las aminas liofílicas, tal como la *morepinefrina* se puede cargar en los liposomas apelando a un simple gradiente de pH²².

En el año 1979 se constató que la velocidad de transporte de iones específicos a través de las bicapas liposómicas se puede aumentar incorporando ionóforos en la bicapa²³. Estas moléculas aceleran el transporte de iones a través de las membranas por formación de canales a través de éstas o formando complejos que pueden lanzar a los iones a través de las membranas. Se encontró que los liposomas pueden cargar cuantitativamente al ión ¹¹¹In³⁺ encapsulando primero un agente quelante dentro del corazón del liposoma e incorporando luego un ionóforo en la bicapa liposomal. Cuando estos liposomas son suspendidos en presencia de ¹¹¹In³⁺, los iones se transportan rápidamente al otro lado de la membrana, impulsados por el gradiente de concentración.

Una vez que están alojados en el interior, se complejan con el agente quelante de modo tal que ya no pueden

abandonarlo. Este procedimiento permite que los reactivos de diagnóstico basados en los liposomas sean preparados como "cajas frías" de liposomas modificados con un agente quelante y un ionóforo. Cuando se agrega la sal de un radioisótopo apropiado (típicamente uno con una vida media corta) a la preparación justo antes de su empleo, el radioisótopo se carga rápida y cuantitativamente dentro del centro del liposoma. Más tarde se usaron gradientes iónicos para promover una adición eficiente del anestésico *cloropromacina* y la droga anticancerígena *vinblastina* dentro de grandes liposomas unilaminares²⁴.

Debido a la alta eficiencia del cargado vía el gradiente iónico (o activo), este método se usa en muchos laboratorios para encapsular drogas en los liposomas. Por ejemplo, tres productos de antraciclina liposomal en pruebas clínicas emplean variaciones de cargado iónico para entrar a los compuestos liofílicos amínicos doxorubicina y daunorrubicina. Las drogas se agregan a las soluciones de liposomas preformados en los cuales ya hay un gradiente entre el interior y el exterior o en uno donde se lo crea. El gradiente químico se descarga cuando la droga pasa a través de la bicapa y un alto porcentaje de la droga se aloja dentro del liposoma.

El tratamiento de infecciones por hongos

Las infecciones por hongos constituyen una seria amenaza a los receptores de trasplantes de médula ósea, pacientes cancerosos sujetos a tratamientos quimioterapéuticos y otros con los sistemas inmunológicos debilitados. Las infecciones más serias usualmente se tratan con anfotericina B, un agente antifúngico con un amplio espectro poliélico. Desafortunadamente, la anfotericina B produce una toxicidad al riñón con riesgo de vida para muchos pacientes cuando se usan dosis cercanas al nivel terapéutico. Entonces, esta droga constituye una candidata ideal para someterla al encapsulamiento liposomal.

A principios de la década del 80 se encapsuló anfotericina B en liposomas multilaminares y se verificó en pruebas clínicas que tal procedimiento reducía significativamente la toxicidad de la droga²⁵. Los liposomas con anfotericina B fueron probados inicialmente en 18 pacientes en quienes la droga libre no había detenido el desarrollo de la infección por hongos del tipo "*Aspergillus*" o "*Candida*". La mayor parte de los pacientes respondió a la droga liposomal, la cual se pudo administrar en mayor dosis debido a que era menos tóxica para los riñones.

En el año 1983 se reconoció el potencial de los liposomas para aumentar el índice terapéutico de la anfotericina B. Se trabajó sobre vesículas laminales pequeñas en las cuales la droga se incorporó dentro de la bicapa liposomática ²⁶. Este método también redujo marcadamente la toxicidad de la anfotericina B. Por ejemplo, una simple inyección intravenosa de la anfotericina B es letal para el 50% de los ratones en una dosis (LD₅₀) de 2.3 mg/kg de peso del cuerpo en la misma variedad de la especie. La preparación del liposoma tenía un LD₅₀ > 160 mg/kg de peso del cuerpo en la misma variedad de ratones. La toxicidad se reduce sin pérdida alguna de eficacia. Como la incorporación de una droga dentro del liposoma disminuye significativamente la incidencia de efectos laterales, se pueden incrementar las dosis a los pacientes humanos hasta un 3-5 mg/kg del peso del cuerpo y por día (si es necesario) sin que haya toxicidad del riñón con riesgo de sobrevida ²⁷. La dosis máxima de droga libre que puede suministrarse es 1 mg/kg de peso del cuerpo y por día, y la mayor parte de los pacientes no pueden recibir este alto dosaje por más de unos pocos días.

El análisis del producto comercial denominado *Ambisome* por medio de la espectroscopía de dicroísmo circular indica que la anfotericina B forma racimos en la bicapa liposomática ²⁸. La estructura más estable se supone que es un canal formado por dos barriles unidos extremo a extremo, cada uno de los cuales está compuesto por 8 moléculas de anfotericina B (Figura 2).

Esta estructura retiene a la droga, dentro de la bicapa liposomal en presencia de células humanas, tales como las células de los glóbulos rojos. Normalmente, estas células serían dializadas por la anfotericina B libre. Sin embargo, cuando el *Ambisome* se incuba con el hongo forma poros en ellos y mata al organismo. Este producto es al menos tan potente como agente fungicida como la droga libre a la misma concentración de anfotericina B, aunque su acción es más lenta.

En el mercado mundo mundial existen otros dos productos comerciales ²⁹⁻³⁰ denominados *Amphocil* y *Abelcet* con características similares y una acción equivalente, aunque tienen formulaciones diferentes.

Todos estos productos de base lipídica de la anfotericina B son más grandes que los poros de filtración del riñón y por ello la droga tiene un acceso restringido a los túbulos sensibles de ese organismo. El liposoma *Ambisome* causa una menor toxicidad aguda (e.g. escalofríos y fiebre), posiblemente porque liga a la anfotericina B más fuertemente que las otras formulaciones.

Diagnóstico y terapia del cáncer

El ¹¹¹In³⁺ encapsulado en liposomas se ha manufacturado como un agente de diagnóstico de tumores *in vivo*. Las pruebas realizadas en seres humanos indican que el producto comercial puede señalar tanto a la enfermedad secundaria (metástasis) como a la primaria. Funciona muy bien para varias clases de tumores sólidos en tejidos suaves y duros y posee una sensibilidad aceptable (i.e. la capacidad para detectar las células tumorales) y una especificidad extremadamente grande (i.e. la habilidad para distinguir entre células tumorales y otros tejidos) ³¹. Estas propiedades lo constituyen en un candidato prometedor

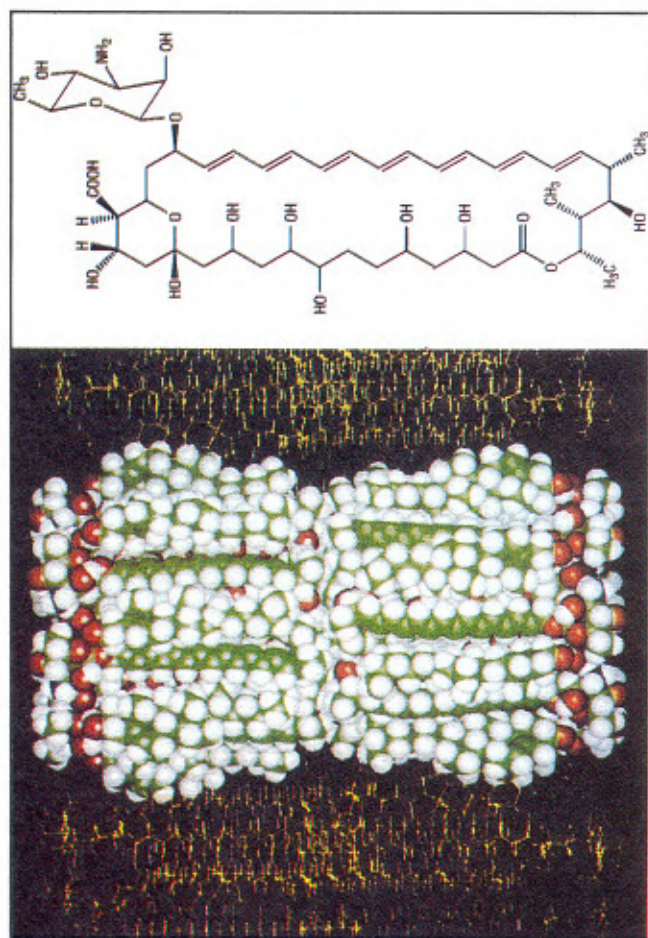


Figura 2. Ocho moléculas de anfotericina B pueden formar una disposición tipo barril con sus residuos hidroxílicos hidrofílicos en el interior. Un empaquetamiento de dos de estos cuerpos pueden expandir la bicapa de un liposoma, creando así un poro, cuya estructura se muestra en esta imagen generada computacionalmente. En color verde se muestran los átomos de carbono, en blanco, los hidrógenos, en azul oscuro, los nitrógenos, y en amarillo, los fosfolípidos y el colesterol. También se muestra la estructura de la anfotericina B.

para monitorear la recurrencia del cáncer luego de la cirugía o para seguir el curso del, tratamiento por quimioterapia. Aunque este producto puede detectar un amplio espectro de tipos de tumores, todavía no ha llegado a mostrar una velocidad tal de detección para alguna clase particular de tumor que ofrezca ventajas competitivas con respecto a los métodos de diagnóstico habituales.

La quimioterapia liposomal del cáncer parece ofrecer mejores perspectivas de cura que los agentes de diagnóstico con base en liposomas. Los liposomas brindan la ventaja potencial de la descarga concentrada de la droga sobre el sitio sólido del tumor, reduciendo su concentración en los blancos indeseables, tales como el riñón o el corazón y proveyendo una liberación sostenida de la droga en el tumor. La reducción de la concentración de droga en el riñón y el corazón es importante ya que la toxicidad en estos órganos a menudo limita drásticamente la dosis de los agentes quimioterapéuticos que se pueden suministrar al paciente con un grado razonable de seguridad.

Varios estudios realizados con ratones implantados con tumores de linfosarcoma mostraron que la encapsulación liposomática de la *daunorubicina*, una droga anticancerígena aprobada para su uso en seres humanos, aumentó la vida media de los ratones enfermos con respecto a otros ratones tratados con la misma dosis de la droga libre (Figura 3). Para la dosis más efectiva, la *daunorubicina* aumentaba la duración de vida de los ratones sin tratar en un 50%. La droga encapsulada liposomáticamente a la mitad de esa dosis era tan efectiva como la droga libre. Pero el ratón podía tolerar dosis conside-

blemente mayores de la droga en los liposomas que lo que podía recibir de la droga libre, presumiblemente porque la encapsulación concentraba la descarga de la droga sobre el sitio del tumor y alejada de los tejidos normales sensibles. Las mayores dosis eran efectivas, dejando a algunos animales liberados de los tumores. Ningún animal en el grupo de administración de la droga libre quedó liberado del tumor. Las pruebas llevadas a cabo hasta el presente con seres humanos con base en la daunorubicina encapsulada en hormonas son completamente consistentes con estos estudios con animales.

Aplicaciones en vacunas antivirales

Los liposomas también están siendo investigados para ser usados en el tratamiento de infecciones virales. Por ejemplo, con base en los resultados previos de investigación³² se ha incorporado el *LamB* (el receptor para el bacteriófago λ) en una bicapa liposómica³³. Mediante el empleo de la microscopía electrónica se demostró que el virus se une a los liposomas modificados e inyecta su ADN dentro de estas vesículas vacías. Luego de haber inyectado su ADN, el virus deja de ser infeccioso. Los investigadores midieron la velocidad de inyección del ADN incorporando bromuro de etidio dentro de la cavidad acuosa de los liposomas y monitoreando el acrecentamiento de la fluorescencia a medida que este flúoróforo se une al ADN inyectado.

También se ha investigado una estrategia similar para el tratamiento de enfermos de SIDA³⁴. En este caso se están usando los liposomas como transportadores de proteínas CD4 hacia la hoja externa de las membranas celulares de los glóbulos rojos.

Esta proteína es el blanco sobre la superficie celular del virus de inmunodeficiencia Humano (HIV), el cual causa el SIDA. Se ha propuesto que cuando estas células se inyectan en un paciente, cualquier HIV se debería ligar y fundir con las células modificadas de los glóbulos rojos. Como estas células no tienen núcleo, el proceso debería efectivamente inactivar al virus.

Los liposomas están siendo investigados como adyuvantes (intensificadores de la inmunogenicidad antigénica) para vacunas. Los antígenos asociados con los liposomas aumentan la producción de anticuerpos y pueden activar células específicas del sistema inmune para combatir a las infecciones de un modo más efectivo.

Terapia genética

Los liposomas pueden transportar al ADN hacia las células para producir la terapia genética. Aunque la ma-

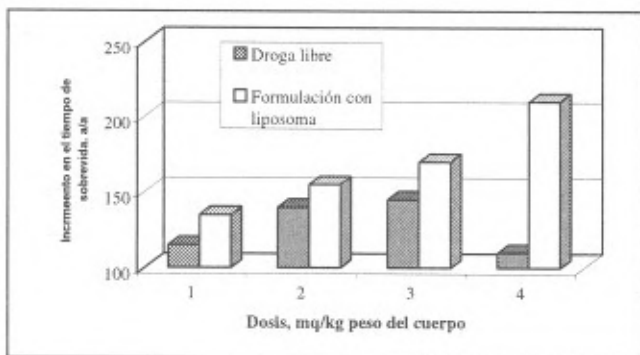


Figura 3. Los ratones con tumores implantados y tratados con daunorubicina encapsulada en liposomas viven un tiempo substancialmente mayor que aquellos tratados con la droga libre. Para dosis altas, a las cuales la droga libre no se puede emplear debido a sus efectos laterales, el producto encapsulado en liposoma aproximadamente dobla el tiempo de sobrevivencia media y también deja a algunos animales libres de tumores.

por parte de los experimentos emplean uno de los varios virus modificados para transportar ADN nuevo a través de la membrana celular, algunas pruebas clínicas en curso de desarrollo actual recurren a los liposomas para liberar el ADN dentro de las células a fin de tratar enfermedades tales como la fibrosis quística³⁵ y el cáncer³⁶. Los liposomas son agentes liberadores prometedores a causa del uso extendido de los virus que, no importa cuan desactivados se encuentren, pueden generar complicaciones indeseables. También se están probando otras aproximaciones, incluyendo la inyección directa del ADN desnudo³⁷ y una variedad de materiales de descarga catiónica diseñados para neutralizar la gran carga negativa del ADN a fin de facilitar su entrada dentro del citoplasma celular y, subsecuentemente, dentro del núcleo³⁸.

En el año 1983 se encontró evidencia para la expresión *in vivo* de la insulina de rata luego de la administración intravenosa del gen encapsulado en el liposoma para esta proteína en ratas normales³⁹. En 1987 se descubrió que los liposomas que contienen ciertos lípidos catiónicos, tal como el ion N-(1,2,3-dioleiloxi-propil)-N,N,N-trimetilamonio (DOTMA) promueve el pasaje del ADN hacia las células, donde puede ser insertado en el núcleo, correctamente transcriptas en el ARN mensajero, y expresado como proteína⁴⁰. Este descubrimiento condujo a una formulación comercial que contiene liposomas catiónicos para la transfección de células en cultivos.

Otros trabajos adicionales han demostrado que otros lípidos catiónicos pueden ser aún más efectivos que el DOTMA. Así, se constató que las variaciones en la longitud y el grado de insaturación de la cadena lateral lipídica, la naturaleza de los grupos unidos al nitrógeno cuaternario y aún la identidad del contraión pueden tener grandes efectos sobre la eficiencia de la transferencia del gen a las células en cultivo⁴¹. También se ha demostrado la eficiente transferencia genética a las células en cultivo mediante el empleo de lípidos poliamínicos³⁸. Recientemente se informó acerca de estudios sobre el mecanismo por el cual estos lípidos catiónicos acrecientan el transporte del ADN a través de las membranas celulares⁴². Se halló que los lípidos aniónicos en la membrana celular pueden disociar el complejo ADN-lípido catiónico luego que éste entra en la célula.

Sin embargo, la mayor parte de los lípidos catiónicos diacíclicos estudiados no han mostrado ser eficientes para la expresión de genes *in vivo*. En efecto, la inyección intramuscular directa del ADN desnudo a menudo es más eficiente que estos complejos de base lipídica³⁶. Asimismo, los lípidos catiónicos son tóxicos. Se pudo demos-

trar que los grupos funcionales cargados que se agregan a las componentes de las membranas, tal como el colesterol, pueden aumentar la eficiencia de transfección y reducir la toxicidad⁴³.

Otra estrategia importante que está siendo estudiada para la descarga *in vivo* de genes es el empleo de dendrímeros, que son estructuras catiónicas ramificadas construidas por generaciones sucesivas de polimerizaciones. Esta particular clase de supermoléculas se descubrieron hace ya más de diez años y poseen una estructura bien caracterizada que depende del número de generaciones de etapas de polimerización.

La real motivación que subyace detrás de todos estos desarrollos es la búsqueda de vectores no virales para la terapia genética. Se necesitan vías para descargar un gen en las células objeto apropiadas, donde éste pueda reemplazar al gen defectuoso. Debido a un simple gen defectuoso, por ejemplo, los pacientes con fibrosis quística no pueden sintetizar una proteína que forma un canal para el transporte iónico a través de la membrana celular de los pulmones. Algunos estudios recientes han mostrado que cuando las copias del gen apropiado complejado con ciertos lípidos catiónicos se instalan directamente en los pulmones del ratón, el transporte iónico deficitario se puede corregir. Así, se han construido vectores de expresión plasmídicos (arrollamientos circulares de ADN que se pueden replicar independientemente del cromosoma) que pueden generar altos niveles de expresión del gen transportado. Se han evaluado muchos lípidos catiónicos para testear sus respectivas capacidades para mediar la transferencia genética con alta eficiencia en las células pulmonares objeto en ratones⁴⁵. Los resultados parecen demostrar que estos complejos de ADN-lípidos se comportan con un nivel de eficiencia comparable a los vectores adenovirales.

Hasta aquí, estos experimentos *in vivo* han usado aplicaciones directas de los complejos ADN-lípidos en los tejidos objeto. Las formulaciones que son marcadamente activas para la transfección usualmente no van al lugar deseado cuando se inyectan por vía intravenosa. Para poder llegar a concretar el objetivo de la descarga selectiva de ADN con la inyección sistémica, las lecciones recogidas acerca del desarrollo de los liposomas deben ser combinadas con la comprensión emergente de los mecanismos acerca de cómo el ADN penetra las células de las membranas.

Conclusiones

Los liposomas ofrecen una base muy interesante y potencialmente valiosa para poder llegar a producir cambios

extraordinarios en la farmacología específicamente dirigida. La mayor parte de las aplicaciones clínicas de la descarga liposomal de drogas todavía se encuentra en sus primeras instancias de desarrollo. Sin embargo, el empleo exitoso en la terapia de enfermedades por hongos así como el diagnóstico y terapia cancerígena parecen mostrar algunas de las enormes posibilidades para este tipo de aproximación. La unión de los receptores virales a los liposomas también pueden abrir otros nuevos campos de la terapia direccionalizada con especificidad para células infectadas viralmente y para la terapia genética. La capacidad artesanal de generar estructuras sintéticas tipo celular junto con la sofisticada funcionalidad creciente seguramente formará una parte importante de la tecnología futura disponible para las aplicaciones en el diagnóstico y la terapia de enfermedades ⁴⁶.

Referencias

1. D.D. Lasic, *La Recherche*. 1989. 20: 904.
2. X. Michalet, F. Jülicher, B. Fourcade, U. Seifert y D. Bensimon, *La Recherche* 1994 25: 1012.
3. A.D. Bangham, M. M. Standish y J. C. Watkins, *J Mol. Biol.* 1965 13: 238.
4. G. Sessa y G. Weissmann, *J. Lipid Res.* 1968 9: 310.
5. V K. Miyamoto y W. Stoekenius, *J. Membr. Biol.* 1973 4: 252.
6. G. Gregoriadis y B. Ryman, *Eur. J. Biochem.* 1972 24: 485.
7. G. Gregoriadis, L. P. Swain y A. S. Tavit, *Lancet* 1974 1: 1313.
8. T.D. Heath, R.T. Fraley y D. Papahadjopoulos, *Science* 1980 210: 539.
9. R. M. Straubinger, K. Hong, D. S. Friend y D. Papahadjopoulos, *Cell* 1983 32: 10691.
10. K. J. Hwang y M. R. Mauk, *Proc., Natl. Acad. Sci. USA* 1977 74: 4991.
11. M. R. Mauk y R. C. Gamble, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 1979 76: 765.
12. C. F. Meares, R. G. Bryant, J. D. Baldeschwieler y D. A. Shirley, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 1969 64: 1155.
13. F. G. Bonte y R. Juliano, *Chem. Phys. Lipids* 1986 40: 359.
14. T. M. Allen y A. Chonn, *FEBS Lett.* 1987 223: 42.
15. D. Papahadjopoulos, T. M. Allen, A. Gabizon, E. Mahew, K. Mathay, S. K. Huang, K. -D. Lee, M. C. Woodle, D. D. Lasic, C. Redemann y F. J. Martin, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 1991 88: 11460.
16. D. Aragnol y L. D. Leserman, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 1986 83: 2699.
17. M. R. Mauk, R. C. Gamble y J. D. Baldeschwieler, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 1980 77: 4430.
18. J. D. Baldeschwieler, *Ann. NY Acad. Sci.* 1985 446: 349.
19. G. Scherphof, H. Morselet, J. Regts y J. C. Wilschut, *Biochem. Biophys. Acta* 1979 556: 196.
20. R. T. Proffitt, L. E. Williams, C. A. Presant, G. W. Tin, J. A. Uliana, R. C. Gamble y J. D. Baldeschwieler, *J. Nucl. Med.* 1983 24: 45.
21. Idem, *Science* 1983 220: 502.
22. J. W. Nichols y D. Deamer, *Biochem. Biophys. Acta* 1976 455: 269.
23. M. R. Mauk y R. C. Gamble, *Anal. Biochem.* 1979 94: 302.
24. L. D. Mayer, M. B. Bally, M. J. Hope y P. R. Cullis, *Chem. Phys. Lipids* 1986 40: 333.
25. G. López-Berestein, *J. Infect. Dis.* 1985 151: 704.
26. J. P. Adler-Moore, S. M. Chiang, A. Satorius, D. Guerra, B. McAndrews, E. J. McManus y R. T. Proffitt, *J. Antimicrob. Chemoter.* 1991 28 (Suppl. B) 63.
27. O. Ringden, F. Meunier, J. Tollemar, P. Ricci, S. Tura, E. Kuse, M. A. Viviani, N. C. Gorin, J. Klastersky, P. Fenaux, H.G. Prentice y G. Ksionski, *J. Antimicrob. Chemoter.* 1991 28: (Suppl. B) 73.
28. G. Fujii, en *Vesicles*, M. Rosoff, Ed., Marcel Dekker, New York, 1996: 491-526.
29. T. F. Patterson, P. Minitier, J. Dijkstra, F. C. Szoka, J. L. Ryan y V. T. Andriole, *J. Infect. Dis.* 1989 159: 171.
30. A. S. Janoff, L. Boni, M. C. Popescu, S. R. Minchey, P. R. Cullis, T. D. Madden, T. Taraschi, S. M. Gruner, E. Shyamsunder, M. W. Tate, R. Mendelsohn y D. Bonner, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 1988 85: 6122.
31. C. A. Presant, R. T. Proffitt, A. F. Turner, L. E. Williams, D. Winson, J. L. Werner, P. Kennedy, C. Wiseman, K. Gala, R. J. McKenna, J. D. Smith, S. A. Bouzagloa, R. H. Callahan, J. D. Baldeschwieler y R. J. Crossley, *Cancer* 1988 62: 905.
32. C. A. Roessner y G. M. Ihler, *J. Biol. Chem.* 1986 261: 386.
33. S. L. Novick y J. D. Baldeschwieler, *Biochemistry* 1988 27: 7919.
34. C. Nicolau, P. F. Tosi, T. Arvinte, Y. Monneimne, A. Cudd, L. Sneed, C. Madoulet, B. Schulz y R. Barhonnii, *Prog. Clin. Biol. Res.* 1990 343: 147.
35. N. J. Caplen, E. W. Alton, P.G. Middleton, J. R. Dorin, B. J. Stevenson, X. Gao, S. R. Durban, P. K. Jeffery, M. E. Hodson, C. Coutelle, L. Huang, D. J. Porteous, R. Williamson y D. M. Geddes, *Nat. Med (New York)* 1995 1: 39.
36. G. L. Nabel, E. G. Nabel, Z. Y. Yang, B. A. Fox, G. E. Plautz, X. Gao, L. Huang, S. Shu, D. Gordon y A. Chang, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 1993 90: 11307.
37. J. A. Wolff, M. E. Dowty, S. Jiao, G. Repetto, R. K. Berg, J. J. Ludke, P. Williams y D. B. Slaughterback, *J. Cell. Sci.* 1992 103: 1249.
38. J. P. Behr, *Bioconjugate Chem.* 1994 5: 382.
39. C. Nicolau, A. LePape, P. Soriano, F. Fargete y M. Fargete y M. F. Johel, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 1983 80: 1068.
40. P. L. Felgner, T. R. Gadek, M. Holm, R. Roman, H. W. Chan, M. Wenz, J. P. Northrop, G. R. Ringold y M. Danielsen, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 1987 84: 7413
41. R. W. Malone, P. Felgner e I. Verma, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*

41. **R. W. Malone, P. Felgner e I. Verma, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 1989 86: 6077.**
42. **O. Zelphati y F. C. Szoka, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 1996 93: 11493.**
43. **X. Gao y L. Huang, *Biochemistry* 1996 35: 1027.**
44. **D. A. Tomalia, H. Baker, J. R. Dewald, M. Hall, G. Kallos, S. Martin, J. Roeck, J. Ryger y P. Smith, *Polym. J.* 1985 17: 117.**
45. **P. L. Felgner, Y. J. Tsai, L. Sukju, C. J. Wheeler, M. Manthorpe, J. Marschall y S. H. Cheng, *Ann. NY Acad. Sci.* 1995 772: 126.**
46. **J. D. Baldeschwieler y P. G. Schmidt, *Chemiec* 1997, 34.**

**DISERTACION PRESENTADA POR EL PRESIDENTE DE LA ACADEMIA DURANTE LA
CONFERENCIA NACIONAL DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE HUNGRIA Y COMO
PARTE DEL PROGRAMA DE LA ICSU
“CAPACITY BUILDING IN SCIENCE”**

**A Proposal for Improving Science Capacity in Colombia:
Capacity Building in Biological Sciences**

by

Luis Eduardo Mora-Osejo*

In the developed countries scientific knowledge, technological know-how, industrial production and economical growth increase intensively, while the developing world has to face, more and more difficult scientific, technological, economical and social challenges.

To overcome successfully that situation, developing countries need an effective cooperation from the developed countries. First of all, developed and developing countries have to integrate efforts for building a scientific capacity in the developing world. The promotion of both, fundamental and applied science will be a high priority in this solidary enterprise.

Fortunately, there exists a general agreement about the issues that have a higher priority for building a scientific capacity in developing countries. Particularly, in those developing countries, like Colombia where only three decades ago, began the process of building a local scientific capacity and to consider science as a part of their culture. In any case, it will take still long time to fill the gap between the amount of scientific and technological knowledge produced and available in the developed countries and that created and available in the developing world.

Fortunately, there is also already a consensus about the protagonic roll played by the improvement of the quality of the different levels of education. Obviously, the improvement of higher education quality will have a definitive impact in Science Capacity Building, as has been emphasized in the Declaration on Higher Education, aproved by the «World Higher Education Conference» of UNESCO, held last October, in Paris.

Taking in account the general state of science development in Colombia and as a contribution for filling the urgent need to enhance scientific knowledge of our natural potencialities through scientific research and to improve science teaching and, in general, Higher Education quality; on behalf of the Colombian Academy of Sciences, let me formulate the following proposal:

Establishment of a Capacity Building in Biological Sciences Network

We propose to establish in the region around the colombian city of Manizales, (also called «The Coffee Axis» (a tropical andine region of the country) a Network of Educational Institutions, of different levels, narrowly interconnected around a central **Tropical Biological Sciences Research and Educational Institute**. This central, Institute will have at first the following tasks: to carry out the cientific research at all the altitudinal levels of the unique tropical high mountain and low lands

* Prof. Dr. rer.nat. President Colombian Academy of Sciences

will perform guided-research-work and other activities, directed to enhance their knowledge about the natural resources of the region. They also need to be acquainted with the problems that affect the people of the region and their resources. Particularly, with those problems that need to be solved for maintaining and strengthening the life support systems and for creating and putting in action an economical endogenous development model, under the conditions of sustainability.

The Interdisciplinary Seminar of the Institute will be the meeting place of professors, associated academical and technical assistants, high school and primary school teachers and pregraduated and graduated students. Workshops, Symposia, Conference cycles and Meetings will be held in BIOTROP for mantaining alive the discussion of the scientific results being obtained, or the proposal of new research and educational projects and

programms to be carry out by the Unities of BIOTROP. All these activities will be held, as activities of the Central Interdisciplinary Seminar of BIOTROP.

When the scientific research and the pregraduated teaching programs have reached a high quality level and the previously mentioned objetives have been fulfilled, **Graduated Study Curricula** will be also established. Of course, only for those research fields that have rified and reached a high scientific quality at the international level.

On the other hand, all these activities will be consistent with the following statement: It is a highest priority for the developing countries to dispose of an adequate number of qualified teachers for the different educational levels and also of creative researchers for building together a scientific capacity. This capacity is also necessary for proposing and applying a sustainable development model. In the case of Colombia, this model



Asistentes a la reunión del programa Capacity Building in Science, Budapest, Hungría, Junio 25 de 1999.

life support systems and of their economical potentialities, originated in the high biodiversity of the colombian low lands and high mountain native forests; to maintain dynamical and creative interrelationships with regional Educational Institutions of different level through conforming with them an educational network.

Once this network has been established the same model, with the appropriate adaptations, could be applied in other colombian regions for Capacity Building in Tropical Biology or other scientific fields. The herewith proposed Institute will be called **Tropical Biology Institute (BIOTROP)** and the whole system: "**Research and Capacity Building in Biological Science Network**".

One of the preliminary and significative steps that must be carefully undertaken for a successful fulfillment of this proposal will be the designation of high qualified "Chair Professors" for each of the **Research and Teaching Unities** that will integrate BIOTROP. This high qualified academical staff will be responsible of the research and of the educational activities of the Unities composing BIOTROP.

When the first research programmes of BIOTROP reach some appreciable first results and the activities carried out for science and teaching improvement, in primary and secondary schools, have shown progressive improvement, **higher education curricula will be also established**. These curricula will be accesible to qualified students that have already finished their high school studies and want to become teachers or professionals of one of the different Biology related disciplines. Among other qualities, these professionals and teachers will be distinguished, particularly, by their high qualified training in tropical biology and by their capacity of proposing models for the sustentable use of biological native tropical resources.

At the beginning the Institute would, possibly operate using the laboratories and the technical assistance of the National Coffee Research Center CENICAFE. As soon as the Institute obtain its own building the laboratories and the library for the **Research and Teaching Unities** will be implemented in agreement with the Chair Professors previously designated for each Research and Teaching Unit. The appropriate equipment will be also installed in the laboratories of each Unit at and the Field Stations located at different altitudinal levels of the Western and Central Cordilleras of Colombia.

First of all, in our Proposal we recognize that the weaknesses of our Educational System are produced,

among others, by: a) confounding knowledge with information; b) memory learning of information, trasmitted in the class room or obtained through textbooks readings; c) absence of a critical analysis of the information; d) absence of motivations for building interrelationships with other issues of the same context; e) predominance of the «authority principle», that is, the acceptance as absolute truth the information, without a previous critical analysis; f) lack of motivation or interest to verify or falsify a questionable «scientific» issue by submitting it to experiment in the laboratory or to careful observation in the field, directed to obtain favorable or unfavorable evidences.

So, we propose, as a general objective, to promote and create effective conditions for intelligent learning. They have to be conditions that stimulate thinking; so necessary for deducing general explanations about phenomena or facts being observed. In this way strenghten intelligent learning will lead to strenghten in the student's mind a conceptual network that, face to face with the natural phenomena, could induce the student to ask himself new questions to be answered and new scientific explanations to be formulated as a result of his research work, performed with his teachers orientation and help. Of course, this will be a first step, for reaching the above described objective what Biological Sciences concerns.

It may in some cases happen that this process could lead to the discovery of still unsolved scientific questions whose solution may imply a new explanation or the creation of a new concept. In this way one of the main strategic objectives of our proposal seeks to promote scientific creativity among the students and, of course, among the primary and high school teachers that are being trained in the Institute.

This is also the reason why, at BIOTROP, Research and Teaching have to be equally valorated and need to be considered complementary activities or aspects of the same purpose and task.

In order to enhance teaching and research quality, but also for the optimization of the operative efficiency of each BIOTROP Unit and of the Network as a whole, it will be necessary to maintain a permanent information exchange and an effective operative collaboration between the **Teaching and Research Unities** of BIOTROP and between each of these Unities and the regional Educational Institutions of the network.

The students and teachers of the high and primary schools of the region that are being trained in the Institute

has to consider the high diversity, coomplexity and fragility of the wet tropical life supporting systems whose conservation depends on their sustainable rational use.

It is also assumed that our strategic approach that consists in considering teaching and research as complementary activities will contribute strongly to the **contextualization** of all the educational programs carried out by the proposed "**Research and Scientific Capacity Building Network**".

Through the scientific research accomplished by the **«Research and Teaching Unities»** of the **Institute of Tropical Biology** the different problems that affect the complex and fragile natural reality will be identified and submitted to study. Students will participate in this study according to their respective level of training. So, students and teachers of different educational levels will become acquainted with such problems and also with the methodology and scientific approaches used in the search for solutions. They will so understand the importance of contributing to solve such problems. All this in contrast with the traditional formalistic teaching of our **Higher Education System** and with their metodological orientation, not contextualized in our natural, economical, social and cultural reality.

For instance, one of the topics that deserves to be introduced in the conceptual framework, necessary for reaching **contextualization** of education and research activities in the tropical region research, is the concept of **tropicality**. Under this concept one has to understand the strong daily thermo-climatical oscillation characteristic of the whole tropical region, different from the annual thermo climatical regimen of the Temperate Regions of the world, from where the predominant developmental model proceeds. It is important to introduce this concept because **tropicality** combined with the intricate mountaineous topography, among other factors, determinates the high complexity and fragility of our life support systems, the human life support systems included.

Among the long term objectives of the proposed **«Research and Scientific Capacity Building Network»**, some of them are directly related with the already mentioned objectives, while others are inderectly connected with following objectives:

To contribute to strenghten the colombian economical sector by the application of the new scientific knowledges obtained through the Network research activities. Particularly, those referring to the identification of the

economical potentialities of the huge colombian biodiversity. In such a way new internationally competitive products can be developed. In other words, products and technologies that would be able to cope sucessfully in the more an more global economical market. On the other hand through a better understanding of life support systems, we hope also to be able not only to maintain the natural biodiversity but also a healthy environment.

Proposal Evaluation

This proposal, has been evaluated during the last two years by different institutions, private or public, of Manizales, the capital of the colombian Departamento de Caldas. It has been also presented in seminars and lectures. Its contents were discussed with recognized personalities of the region who have evaluated it positively. They will also be willing to colaborar for getting financial resources needed for its establishment and to give it logistic support.

The following colombian Institutions have considered positively this proposal: University of Caldas; National Research Center for Coffee (CENICAFFE) and Biotropical Foundation-Manizales.

The proposal will be also presented for its evaluation to the following Institutions of the Ministry for the Environment: Institute for Hydrology, Meteorology and Environmental Studies, IDEAM; Natural Parks National System and Strategic Colombian Ecosystems.

By the opportunity of this **ICSU-Capacity Building in Science Conference I** should like to emphasize that for the sucessfull fulfillment of this proposal it is also necessary to have financial support from International Scientific Capacity Building Programs, among other possible financial sources.

For the attainment of success of this proposal it will be also very important to obtain International Academical Support. Particularly, it will be necessary to link to its research and educational activities scientists from developed countries. Particularly, scientists with a deep knowledge and a good experience, in tropical high mountain Ecology, Bioclimatology, Edaphology and Genetics, among other disciplines. In the same way, we hope to obtain some collaboration for getting scientific equipment for both, the Laboratories and the network of Field Stations of the Tropical Biology Institute (BIOTROP) that will be installed in the most representative and strategic ecosystems of tropical low land and of the different altitudinal levels of the Cordilleras, of Colombia.

At the beginning the BIOTROP will probably make use of the CENICAFE laboratory facilities. It is also possible that the scientific staff of this Institute will participate in research projects and teaching activities of BIOTROP.

Another priority activity will be to perform, with the participation of the University of Caldas and other Regional Institutions, particularly, the Biotropic Association, a critical study of the present problems affecting the Educational Institutions of the Department of Caldas. The results of this study will be given high relevance in the

configuration of the interdisciplinary educational programs of the proposed Tropical Biology Institute.

It has been calculated that at the beginning the annual costs per student will be approximately US\$6.752.00. For a total of approx. 230 students of diverse proceeding (Teachers of Primary and Secondary Schools included), once the different basic and advanced **blocks and cycles** of the **Biological Sciences Academic Curriculum**, annexed to the text of this proposal will be offered.

Budapest, 25 June, 1999.

CONSTITUCION DE LA ACADEMIA

JUNTA DIRECTIVA

Período 1998 - 2000

Presidente	:	Luis Eduardo Mora-Osejo
Vicepresidente	:	Moisés Wasserman Lerner
Secretario	:	José A. Lozano-Iriarte
Tesorero	:	Inés Bernal de Ramírez
Bibliotecario	:	Víctor Albis-González
Director de la Revista	:	Santiago Díaz-Piedrahita

MIEMBROS HONORARIOS

Jorge Ancízar Sordo	Hernando Groot Liévano	Rodolfo R. Llinás
Luis Duque Gómez	Mohamed H. Hassan	Angel M. Municio
Carlo Federici Casa	Thomas van der Hammen	

MIEMBROS DE NUMERO

Sucesión de las sillas. Se distingue con asteriscos (*) a los miembros fundadores y con un punto (O) a los académicos que han pasado a la situación de exnumerarios (Art. 15 de los Estatutos)

- † Jorge Acosta Villaveces - 1936*.
† Leopoldo Guerra Portocarrero - 1954.
† Eduardo Acevedo Latorre - 1970.
Eduardo Calderón Gómez - 1984.
- † Jorge Alvarez Lleras - 1936*
O Alfonso Tribín Piedrahita - 1967.
Vacante
- † Antonio María Barriga Villalba - 1936*.
† Kalman C. Mezey - 1957.
Lorenzo Panizzo Durán - 1984.
- † Alberto Borda Tanco - 1936*.
† Hernando Franco Sánchez - 1960.
Manuel del Llano Buenaventura - 1986.
- † Julio Carrizosa Valenzuela - 1936*.
† Eduardo Caro Caycedo - 1976.
Jairo Mojica Corzo - 1997.
- † Víctor E. Caro - 1936*.
Jorge Arias de Greiff - 1966.
- † Luis Cuervo Márquez - 1936*.
† Daniel Mesa Bernal - 1960.
Jesús A. Eslava Ramírez - 1995.
- † Federico Lleras Acosta - 1936*
† Andrés Soriano Lleras - 1957.
Gabriel Toro González - 1976.
- † Ricardo Lleras Codazzi - 1936*
Luis Duque Gómez - 1960 (H).
Vacante
- † Rafael Torres Mariño - 1936*.
Hernando Groot Liévano - 1966 (H).
Vacante
- † César Uribe Piedrahita - 1936*.
† Clemente Garavito Baraya - 1970.
Vacante
- † Darío Rozo Martínez - 1936*.
Luis Guillermo Durán Solano - 1970.
- † Calixto Torres Umaña - 1936*.
† José María Garavito Baraya - 1970.
Humberto Rodríguez Murcia - 1993.
- † Luis María Murillo Quinche - 1936*
† Hno. Daniel González Patiño - 1976.
Víctor Samuel Albis González - 1992.
- † Enrique Pérez Arbeláez - 1936*.
† Gerardo Reichel Dolmatoff - 1973.
Alicia Dussan de Reichel - 1994.
- † Luis López de Mesa - 1937.
Luis Eduardo Mora Osejo - 1970.
- † Luis Patiño Camargo - 1937.
Guillermo Castillo Torres - 1983.
- † Daniel Ortega Ricarte - 1938.
O Alberto Morales Alarcón - 1970.
Vacante
- † Julio Garzón Nieto - 1939.
† Gustavo Perry Zubieta - 1970.
Hernando Dueñas Jiménez - 1989.
- † Ernesto Osorno Mesa - 1939.
Luis E. Gaviria Salazar - 1981.
- † Armando Dugand Gneco - 1941.
† Alvaro Fernández Pérez - 1973.
Enrique Forero González - 1997
- † Alfonso Esguerra Gómez - 1944.
† Carlos Páez Pérez - 1970.
Santiago Díaz Piedrahita - 1988.
- † Jesús Emilio Ramírez - 1944.
Julio Carrizosa Umaña - 1983.
- † Luis H. Osorio - 1944.
† Antonio Olivares - 1966.
† José Rafael Arboleda C. - 1982.
Carlos Corredor Pereira - 1996.
- † Fabio González Tavera - 1945.
† Eduardo Rico Pulido - 1970.
Carlos E. Acosta Arteaga - 1973.
- † Eduardo Lleras Codazzi - 1945.
† Sven Zethelius Pañalosa - 1966.
Augusto Rivera Umaña - 1996.
- † Marcelino de Castellvi - 1945.
† Francisco Lleras Lleras - 1970.
† Alvaro Torres Barreto - 1990.
Margarita Perea Dallos - 1996.
- † Manuel José Casas Manrique - 1945.
María Teresa Murillo Pulido - 1975.
- † Belisario Ruiz Wilches - 1946.
Moisés Wasserman Lerner - 1992.
- † Guillermo Muñoz Rivas - 1950.
Paulina Muñoz Vila - 1994.
- † Jorge Ancízar Sordo 1951.
Eduardo Posada - 1993.
- † Alfredo Batemán 1951
Carlos E. Vasco Uribe - 1992.
- † Jorge Bejarano - 1951.
† Gabriel Sanín Villa - 1970.
O Jaime Ayala Ramírez - 1973.
Vacante
- † Vicente Pizano Restrepo - 1952.
José A. Lozano Iriarte - 1992.
- † Luis Augusto Cuervo - 1952.
† Santiago Triana C. - 1970.
Gonzalo Correal Urrego - 1984.
- † José Ignacio Ruiz - 1952.
Gerardo Pérez Gómez - 1995.
- † Lorenzo Uribe Uribe - 1952.
Inés Bernal de Ramírez - 1986.
- † Carlos Ortíz Restrepo - 1956.
Eduardo Brieva Bustillo - 1980.
- † Augusto Gast Galvis - 1957.
José Luis Villaveces Cardoso - 1988.
- † O Hernando J. Ordóñez - 1957.
Vacante

MIEMBROS CORRESPONDIENTES ACTIVOS

Andrade, M. Gonzalo - Bogotá
Arboleda, Luis Carlos - Cali
Barrera, Luis Alejandro - Bogotá
Cadena García, Alberto - Bogotá
Caicedo Ferrer, Xavier - Bogotá
Cala Cala, Plutarco - Bogotá
Campos Romero, Diógenes - Bogotá
Caravallo, Luis - Cartagena
Castro Alfonso - Texas. USA.
Charris, Jairo - Bogotá
Duque Beltrán, Carmenza - Bogotá
Escobar, José Fernando - Ithaca. USA.
Espinosa, Armando - Armenia
Etayo Serna, Fernando - Bogotá
Fernández-Alonso José Luis - Bogotá
Gaviria, Santiago - Medellín
George, Jaime - Bogotá
Gordillo, Gerardo - Bogotá
Guzmán Angela María - Bogotá
Hermelin, Michel - Medellín
Hernández Camacho, Jorge - Bogotá
Lesmes Camacho, Jaime - Bogotá
Lynch, John D. - Bogotá

Lleras Pérez, Eduardo - Brasilia
Malagón Castro, Dimas - Bogotá
Martínez Collantes. Jorge - Bogotá
Martínez Valderrama, Juan - Bogotá
Mojica, Tobias - Bogotá
Moreno, Carlos Julio - New York
Moreno Luis Enrique - México
Nieto, José Ignacio - Montreal
Ospina Hernández, Mariano - Bogotá
Páramo Rocha, Guillermo - Bogotá
Patiño, Víctor Manuel - Cali
Pinto Escobar Polidoro - Bogotá
Poveda Ramos, Gabriel - Medellín
Prieto, Pedro Antonio - Cali
Quintero Quintero, Josué - Bogotá
Rangel Churio, Orlando - Bogotá
Restrepo Moreno, Angela - Medellín
Reynolds Pombo, Jorge - Bogotá
Rincón, José María - Bogotá
Rodríguez Lara, Jaime - Bogotá
Roldán Pérez Gabriel - Medellín
Shuk Erdos, Tomás - Bogotá
Varela, Juanuario - Bogotá

MIEMBROS CORRESPONDIENTES EXTRANJEROS

ARGENTINA

Sahade, Jorge - Buenos Aires

ALEMANIA

Schnetter, Reinhard - Giessen
Weber, Hans - Mainz
Sturm, Helmut - Hildesheim

AUSTRIA

Flamm, Dieter - Institut für Theoretische Physic, Viena
Sheidegger Adrian - Institut für Theoretische Geodäsie und Geophysik - Viena

ESPAÑA

De Porta Vernet, Jaime (E) - Barcelona
Fernández de Soto Morales, Fernando - Madrid
Lora Tamayo, Manuel - Madrid
Torroja Menéndez, José María - Madrid

ESTADOS UNIDOS

Schultes, Richard Evans - Cambridge, Mass

FRANCIA

Lourteig, Alicia - Muséum National d'Histoire Naturelle
Laboratoire de Phanerogamie, París.
Tricart, Jean - Centre de Géographie Appliquée Estrasburgo

HOLANDA

Cleef, Antoine M. - Amsterdam

MEXICO

Guzmán Huerta, Gastón - Instituto de Ecología, Depto. de Hongos, Xalapa, Veracruz.
Joseph-Nathan, Pedro. Centro de Estudios Avanzados. Depto. de Química. Instituto Politécnico - México

PERU

Pulgar Vidal, Javier - Lima

SUECIA

Wassén, Henry S. - Gotemburgo