



AVANCES

EN CIENCIAS E INGENIERIAS

1 DE ABRIL DE 2009
Vol. 1 - N° 1
<http://www.usfq.edu.ec/avances>

Universidad San Francisco de Quito

Autoridades

Santiago Gangotena G., Ph.D.
Canciller

Carlos Montúfar F., Ph.D.
Presidente de la Universidad

Gonzalo Mendieta, Ph.D.
Vicepresidente de Asuntos Académicos

Editor

Cesar Zambrano, Ph.D.
Profesor de Química e Ingeniería Química.
Vice-Decano, Colegio de Ciencias e Ingeniería

Co-Editores

Stella de la Torre, Ph.D.
Profesora de Ecología Aplicada
Decana, Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales

María de Lourdes Torres, Ph.D.
Profesora y Directora del área de Biotecnología.
Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales

Fernando Romo, M.Sc.
Profesor y Director del área de Ingeniería Civil y de la Maestría en Dirección de Empresas
Inmobiliarias.
Decano, Colegio de Ciencias e Ingeniería

Ximena Córdova, Ph.D.
Profesora y Directora del área de Ingeniería Industrial.
Vice-Decana, Colegio de Ciencias e Ingeniería

Administrador de Formato

Julio Ibarra, M.Sc.
Profesor, Colegio de Ciencias e Ingeniería

Introducción

Este año académico, 2008-2009, en que se publica la primera revista *Avances en Ciencias e Ingenierías* coincide con los veinte años de la fundación de la Universidad San Francisco de Quito. Fue hace 20 años que en una casa en la Avenida 12 de Octubre en el Norte de la ciudad capital del Ecuador, Quito, se comienza a forjar la primera universidad totalmente privada en el país. Su filosofía se basa en las Artes Liberales, en la tradición del sistema universitario de los Estados Unidos de América, para formar lo que denominé generalistas-especializados. En esta visión se buscaba romper con la idea permanente de que la universidad es el camino a una licencia para una profesión y sustituirla con la de formar a la persona.

Se comenzó con tres unidades académicas, Comunicación (donde se incluía a las Artes), Administración y Ciencias Aplicadas. A pesar de esta visión humanista de la educación universitaria, fuimos paulatinamente y con escasos fondos ingresando en el campo de la investigación y publicando en revistas especializadas de física y sociología y realizando conferencias, exposiciones artísticas y publicando algunos libros en áreas como industria, literatura, y nutrición.

Nuestra visión era también internacional y se firmaron los primeros acuerdos con tres universidades de los Estados Unidos, *University of Illinois*, *University of North Carolina* y *Kalamazoo College*, las cuales abrieron una dimensión extraordinaria en la formación de muchos estudiantes que participaron en los programas de intercambio. En el año 19 recibimos 947 estudiantes extranjeros de 40 países y tenemos acuerdos con más de 90 universidades de los Estados Unidos, además de muchos otros convenios en la China, Japón, Singapur, América del Norte y Europa. En un día cualquiera tenemos alrededor de 100 estudiantes de la USFQ en esas universidades.

De 12 profesores fundadores y 132 estudiantes, hoy tenemos unos 250 profesores a tiempo completo, 450 a tiempo parcial con el mayor número de profesores con Ph.D, en el Ecuador y 5200 estudiantes a nivel de pregrado y postgrado y cubrimos prácticamente todas las áreas del saber, incluyendo la Arquitectura, Jurisprudencia, Medicina, las Ingenierías y Arte Culinario. La biblioteca es la más moderna del Ecuador y es depositaria de varias colecciones de organismos internacionales. Mantenemos un campus bello que ofrece todos los servicios necesarios para que la educación sea placentera y con una visión global, pues estamos conectados con tecnología de punta en comunicaciones, ya que somos representantes de *Cisco Systems* para el Ecuador. Sin duda somos, si no la primera universidad en investigación en el país, una de las primeras.

Nuestros graduados ocupan cargos de la más alta responsabilidad en el Ecuador y el mundo. Con orgullo podemos decir que la calidad de nuestros estudiantes es reconocida por cientos de empresas y universidades del mundo. Esta publicación marca un hito en nuestro desarrollo pues hemos logrado, a través de un crecimiento sostenido, con nuestros ingresos privados,

llegar a tener profesores únicos en la región por su calidad humana y desempeño profesional que han sido la razón del éxito de esta empresa.

En las ciencias exactas e ingenierías los logros han sido múltiples, especialmente en la Física. A pesar de que estos primeros años de la Universidad han sido dedicados ante todo a la enseñanza, en forma paulatina contamos en este aniversario con una de las mejores infraestructuras de laboratorios en ciencias y, ésta publicación de AVANCES marca el hito del comienzo de una nueva etapa en nuestro desarrollo, la investigación intensa. Desde hace 5 años comenzamos la formación de profesionales a nivel de *Master of Science* en Matemáticas, Microbiología y Física en un programa que permite a los estudiantes dedicarse a tiempo completo al estudio y a la investigación, además de otros programas con reconocimiento internacional. El número de profesores de ciencias a tiempo completo ya nos permite mantener una publicación periódica de alta calidad.

Es así que la revista *Avances en Ciencias e Ingenierías* nace del espíritu emprendedor, característico de los profesores y estudiantes de la USFQ. Esta primera edición es pues un tributo a 20 años de educación de calidad y aporte investigativo. Investigación, que por su importancia e impacto ha sido regularmente publicada y reconocida en el extranjero, tal vez disminuyendo la posibilidad de compartirla con la comunidad local.

AVANCES se editará periódicamente con la intención de promover la realización y publicación de trabajos originales en los campos de ciencia e ingeniería en el Ecuador y la región, convirtiéndose en un medio más para divulgar y aglutinar el conocimiento científico. Con este motivo invito a todos los investigadores a participar con todos nosotros en esta gran tarea de compartir sus trabajos para impulsar el desarrollo de la ciencia y la tecnología en la región.

Santiago Gangotena González, PhD
Presidente y Fundador de la Universidad San Francisco de Quito

ARTICULOS

Impacto humano sobre la diversidad de mamíferos en tierras Secoya, Amazonía ecuatoriana.

Stella de la Torre & Hernán Payaguaje.

Pág. 1

Estimación del Tiempo de Llegada en un Canal Rayleigh desde una Perspectiva de la Cota Inferior de Cramer-Rao.

René P. Játiva E. & Josep Vidal M.

Pág. 5

Evaluación de la calidad de agua a través de macroinvertebrados bentónicos e índices biológicos en ríos tropicales en bosque de neblina montano.

D. Carolina Arroyo J. & Andrea C. Encalada

Pág. 11

Desarrollo de una aplicación de Servicios Basados en Localización para redes celulares de tipo Global System for Mobile (GSM) y Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) usando el emulador Mobile Positioning System 6.0.1 provisto por la empresa Ericsson.

Paul A. Prócel M, Luis M. Prócel M., René Játiva, Julio Arauz

Pág. 17

Seguimiento de dispositivos móviles en un sistema de comunicaciones móviles celulares.

Santiago Silva Proaño & René Játiva.

Pág. 23

Una propuesta de cambio sustancial en la enseñanza de la Matemática en la escuela elemental.

Valentina Aguilar

Pág. 29

Proyectivización y Dimensiones Nomológicas.

Juan Carlos Bustamante, François Huardy, David Smithz

Pág. 31

Aluminosilicatos mesoporosos catalíticamente activos obtenidos usando el biopolímero quitosano como agente formador de poros.

E. Alexis Hidrobo, Jaime Retuert, Paulo Araya F.

Pág. 37

Análisis macro-cinético de la infiltración química de vapor de capas de Si y Si/SiC en estructuras biomórficas de carbono.

Daniela Almeida S.

Pág. 41

Anclaje de paredes de dominio de interfaces ferromagneto/antiferromagneto en la manganita $\text{Pr}_{0.5}\text{Sr}_{0.5-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ con separación de fases.

Darío G. Niebieskikwiat & Rodolfo D. Sánchez

Pág. 49

Un algoritmo simple y eficiente para la clasificación automática de páginas web

Maria del Cisne García, Fausto Pasmay, Enrique V. Carrera

Pág. 57

Diferenciación molecular en variedades cultivadas de tomate de árbol (*Solanum betaceum*), mediante la técnica molecular de AFLP.

Soledad R. Ordoñez A., María de L. Torres P., Venancio S. Arahana B.

Pág. 63

Evaluación de la variabilidad genética del tomate de árbol (*Solanum betaceum* Cav.) en los cultivos de tres provincias del Ecuador por medio de marcadores microsatélites.

Nicolás Peñafiel L. Venancio S. Arahana B. & Maria de L. Torres P.
Pág. 69

Regeneración de plantas de tomate de árbol (*Solanum betaceum*) a partir de protoplastos.
Luís A. Riofrío R Andrea S.Arias A., Venancio S. Arahana B. & María L. Torres P.
Pág. 75

Cayendo hacia un agujero negro de Schwarzschild
Carlos A. Marín
Pág. 79

RESÚMENES DE PROYECTOS FINALES

Diseño y validación de una metodología para el estudio de la Comunicación Vibratoria en la especie *Clothoda longicauda* (Embióptera: Clothodidae).
Carolina Proaño Serrano
Pág. 93

Diseño estratégico del sistema de distribución para el proyecto de empresa food service s.a.
Daniel E. Merchán D.
Pág. 95

Patrones comportamentales de la construcción de domicilios de seda de dos especies de Embíidos tropicales (Insecta: Embioptera).
Sebastián Cruz
Pág. 101

APENDICE

Otras publicaciones de la USFQ, 2007-2008.
Pág. 103

LISTA DE AUTORES

Aguilar, Valentina
Almeida S., Daniela
Arahana, Venancio S.
Arauz, Julio
Araya Figueroa, Paulo
Arias, Andrea S.
Arroyo J., Carolina
Bustamante, Juan Carlos
Carrera, Enrique V.
Cruz, Sebastián
de la Torre, Stella
Encalada, Andrea C.
García, María del Cisne
Hidrobo, E. Alexis
Huardy, François
Játiva Espinosa, René
Marín, Carlos A.
Merchán D., Daniel
Niebieskikwiat, Darío G.
Ordoñez A., Soledad
Pasmay, Fausto
Payaguaje, Hernán
Peñafiel L., Nicolás
Proaño Serrano, Carolina
Prócel, Paúl A.
Prócel, Luis M.
Retuert De la Torre, Jaime
Riofrío, Luís A.
Sánchez, Rodolfo D.
Silva Proaño, Santiago
Smithz, David
Torres P., María de Lourdes
Vidal M., Josep

IMPACTO HUMANO SOBRE LA DIVERSIDAD DE MAMÍFEROS EN TIERRAS SECOCYAS, AMAZONÍA ECUATORIANA

Stella de la Torre^{*1,2} Hernán Payaguaje³

1 Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales, USFQ.

2 Fundación VIHOMA.

3 Nacionalidad Secoya.

Resumen

Para evaluar el impacto de la cacería sobre la diversidad de mamíferos en las tierras Secoya, al nororiente del Ecuador, utilizamos una metodología no invasiva basada en el uso de “trampas de cámara” ubicadas en bosques a diferentes distancias de los asentamientos Secoya desde abril a diciembre 2006. Registramos un total de 20 especies de mamíferos pertenecientes a 14 familias. Las especies con mayor número de registros fueron la guatusa *Dasyprocta fuliginosa*, el sahino *Pecari tajacu* y la guanta *Agouti paca*. La diversidad de especies, estimada por el número de especies registradas por mes, fue significativamente menor en bosques cerca de asentamientos humanos que en bosques alejados de los asentamientos. Presentamos también datos preliminares de la abundancia relativa de las especies y de sus patrones de actividad diaria y estacional. El carácter participativo de la investigación ha facilitado la toma de conciencia por parte de los Secoya sobre los impactos negativos de la cacería y será un pilar importante para el desarrollo de un programa de manejo de cacería eficaz y adecuado a su realidad ambiental y cultural.

Palabras Clave. Amazonía ecuatoriana, cacería, diversidad, mamíferos

Introducción

Los estudios de campo sobre la diversidad de mamíferos en varios ecosistemas han sido usados para evaluar los efectos de algunos factores ambientales sobre la estructura de las comunidades biológicas [1, 2, 3]. Uno de estos factores de creciente importancia en la actualidad en los bosques tropicales es la cacería [4, 5, 6]. El incremento de la presión de cacería sobre los mamíferos amazónicos está influido por el mayor contacto de las nacionalidades indígenas con la cultura occidental (relacionado principalmente con el uso de armas de fuego) y por el incremento de las poblaciones humanas en la región [7, 8].

La cacería, ya sea comercial o de subsistencia, no solo reduce la diversidad de especies en un área, si no que afecta también al comportamiento de las especies cazadas; éstas tienden a hacerse más tímidas y cautelosas y a evitar los encuentros con seres humanos [4]. Estos cambios en el comportamiento dificultan considerablemente la realización de estudios para evaluar los impactos de este factor pues los animales son raramente observados aun cuando estén presentes en el área. Una herramienta importante para solucionar este problema es el uso de trampas de cámara. Esta metodología no invasiva permite registrar la presencia de especies nocturnas y poco conspicuas de mamíferos y es ideal en áreas donde la cacería ha afectado al comportamiento de los animales [9,10].

De las 40 000 ha que constituyen las tierras Secoya en la Amazonía norte del Ecuador, la mayoría ha sido alterada por actividades humanas. Las tierras Secoya están rodeadas de campos petroleros cuya actividad ha contaminado los ríos y ha facilitado el ingreso de colonos, incrementando las tasas de deforestación. Para agravar la situación, en los

límites de esta área existe un complejo industrial, con alrededor de 20 000 ha de palma africana. Sumados a estos factores externos, están el continuo crecimiento de la población Secoya y su inserción en la civilización occidental y en sus patrones de consumo [11] presentadas en el párrafo anterior, teníamos evidencia de que la presión de cacería debía también contribuir a la reducción de la biodiversidad en los bosques Secoya por lo que, en un programa de investigación participativa con los miembros de la Nacionalidad Secoya que iniciamos en el año 2006 y 2007 nos propusimos cuantificar el impacto de esta actividad [11]. En este estudio evaluamos la influencia de la cacería y la presencia humana sobre la diversidad de mamíferos mediante el uso trampas de cámara colocadas en bosques a diferentes distancias de los asentamientos Secoya; esperábamos encontrar una mayor diversidad de especies registradas en las cámaras más alejadas. Al utilizar una metodología no invasiva, esperábamos también tener información confiable sobre los patrones de actividad, diaria y estacional, de la especies de caza con el fin de desarrollar un plan de manejo de la cacería en las tierras Secoya.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio se ubicó en los bosques de varzea -bosques inundados por ríos de aguas blancas, y de tierra firme - bosques no inundados sobre pequeñas colinas [12], de la comunidad Secoya Siecoca Remolino (Sehuaya). El bosque de varzea se ubicó en la orilla norte del río Aguarico, en tierras Secoya dentro de la Reserva de Producción Faunística Cuyabeno. El bosque de tierra firme se ubicó en la orilla sur del río Aguarico [9].

Métodos

Para este estudio utilizamos trampas de cámara, esto

es, cámaras con sensores infrarojos y de movimiento para registrar en imágenes fotográficas la presencia de mamíferos terrestres. El monitoreo fotográfico de las especies se realizó diariamente en las dos épocas climáticas del año, desde abril hasta agosto de 2006 en la época lluviosa, y desde septiembre a diciembre de 2006 en la época seca. Ocho cámaras se ubicaron en hábitats con diferente presión de cacería, cerca (aprox. 500 m) y lejos (aprox. 1000 m) de asentamientos humanos, bajo el supuesto que la presión de cacería era mayor cerca de los asentamientos, en los dos tipos de bosque [9].

Las cámaras fueron revisadas y los rollos retirados cada 15 días para evitar que la condensación de la humedad ambiental afectara a las películas. Una vez reveladas, las fotografías fueron digitalizadas e identificadas con ayuda de los parabiólogos Secoya y de guías de campo especializadas [13, 14]. Con estos resultados determinamos la riqueza de especies de mamíferos en áreas cerca y lejos de asentamientos humanos en los dos tipos de bosque. Las comparaciones de la diversidad de mamíferos registrados en las cámaras cerca y lejos de los asentamientos humanos fueron realizadas con pruebas de t pareadas (StatView SE). Gracias a la información incluida en cada fotografía sobre la hora a la que fue tomada, pudimos también conocer los patrones de actividad diaria de las especies. Así mismo, estimamos los patrones estacionales de actividad con base en el número de meses en que cada especie fue registrada.

Resultados

Al identificar los 219 registros fotográficos de las cámaras ubicadas en tierra firme y en varzea obtuvimos un total de 20 especies de mamíferos pertenecientes a 14 familias (Tabla 1). La especie con mayor número de registros en los dos tipos de bosque fue la guatusa *Dasyprocta fuliginosa* (50 registros), seguida por el sahino *Pecari tajacu* (34) y la guanta *Agoutipaca* (31). Seis especies, de 5 familias, fueron registradas una sola vez (Fig 1).

Especie	Familia
<i>Marmosa</i> sp.	Didelphidae
<i>Mazama americana</i>	Cervidae
<i>Mazama gouazoubira</i>	Cervidae
<i>Pecari tajacu</i>	Tayassuidae
<i>Speothos venaticus</i>	Canidae
<i>Atelocynus microtis</i>	Canidae
<i>Herpailurus yagouaroundi</i>	Felidae
<i>Leopardus pardalis</i>	Felidae
<i>Eira barbara</i>	Mustelidae
<i>Nasua nasua</i>	Procyonidae
<i>Procyon cancrivorus</i>	Procyonidae
<i>Dasybus novemcinctus</i>	Dasypodidae
<i>Cabassous unicinctus</i>	Dasypodidae
<i>Myrmecophaga tridactyla</i>	Myrmecophagidae
<i>Cebus albifrons</i>	Cebidae
<i>Agoutipaca</i>	Agoutidae
<i>Dasyprocta fuliginosa</i>	Dasypodidae

<i>Myoprocta acouchi</i>	Dasypodidae
<i>Proechymis</i> sp.	Echymidae
<i>Sciurus igniventris</i>	Sciuridae

Tabla 1. Especies de mamíferos registradas en las trampas de cámara en tierras Secoya (Abril - Diciembre 2006)

La abundancia de cada una de las especies no fue uniforme a lo largo del estudio. Del total de especies “capturadas” en las fotografías, solamente una, la guanta, fue registrada en todos los meses [9]. El armadillo de nueve bandas *Dasybus novemcinctus* y la guatusa fueron registrados en 8 y 7 de los meses de estudio, respectivamente. Siete especies de 6 familias fueron registradas solamente en uno de los meses de estudio (Fig 1).

Al comparar la diversidad de especies, estimada por el número de especies registradas por mes, en sitios cerca de asentamientos humanos - donde se espera una mayor presión de cacería - y sitios alejados de los asentamientos - donde se espera una menor presión de cacería - encontramos diferencias significativas para las comunidades de mamíferos en los dos tipos de bosque (promedio de especies registradas por mes en tierra firme cerca = 2.3 especies $\pm$ 0.9, promedio en tierra firme lejos = 4.4 especies $\pm$ 0.5; t pareado (8) = -3.0, p = 0.01; promedio en varzea cerca = 2.2 especies $\pm$ 1.0, promedio en varzea lejos = 4.2 especies $\pm$ 0.6; t pareado (8) = -2.9, p = 0.02)(Fig2).

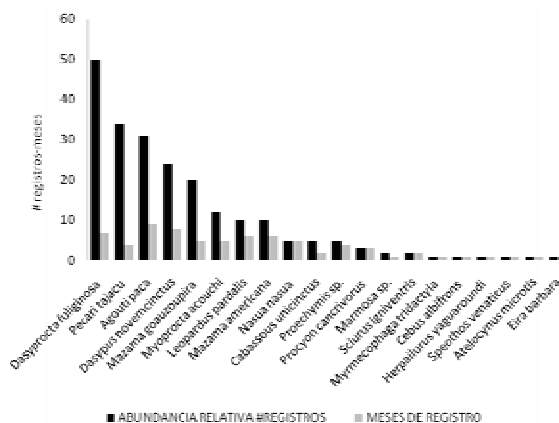


Figura 1. Abundancia relativa (total de registros) y variación mensual-estacional (total de meses con registros) de las especies de mamíferos en tierras Secoya

Las horas a las cuales se tomaron las fotografías de los animales nos permitieron estimar los patrones de actividad diaria de las especies; algunas de ellas, como la guatusa y el sahino fueron registradas exclusivamente durante el día (06h00-18h00). Otras especies, como la guanta y el armadillo de nueve bandas, fueron registradas exclusivamente durante la noche (19h00-05h00). Finalmente, especies como el venado cenizo, *Mazama gouazoubira*, y el venado rojo *M. americana* fueron registradas tanto en el día como en la noche; sin embargo, la primera tuvo más registros diurnos mientras que la segunda tuvo más registros nocturnos (Fig 3).

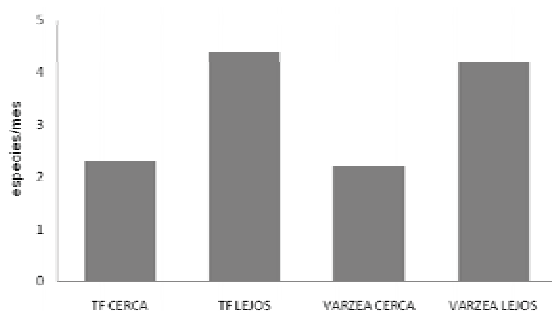


Figura 2. Diversidad de mamíferos (promedio de especies registradas por mes) cerca y lejos de asentamientos Secoya en bosques de tierra firme y varzea.

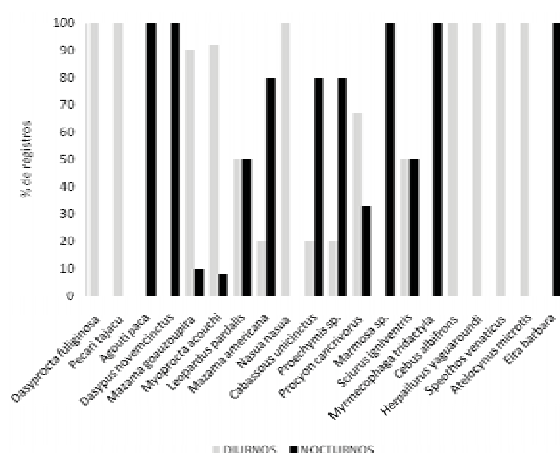


Figura 3. Patrones de actividad diurna y nocturna (% de registros diurnos vs. nocturnos) de las especies registradas

Gracias al uso de esta metodología no invasiva, pudimos determinar los meses de reproducción de algunas especies de caza como la guanta, fotografiada con cría en el mes de mayo, y de otras especies raras, como el banderón *Myrmecophaga tridactyla*, fotografiada apareándose en el bosque de varzea, en el mes de septiembre.

Discusión

Tradicionalmente, los Secoya fueron un pueblo de cazadores-recolectores que se movían por extensas áreas de bosque [15]. En la actualidad, el área disponible para los Secoya se ha reducido considerablemente, la población está aumentando y los métodos ancestrales de cacería, basados en el uso de cerbatanas y lanzas, han sido reemplazados por armas de fuego. Como consecuencia, la presión de cacería es cada vez mayor y está reduciendo la diversidad de mamíferos en los bosques, como evidenciamos en este estudio. Estos resultados son una alerta que debe ser usada por la Nacionalidad Secoya para regular esta actividad en el corto plazo y evitar así que sus bosques sean ecosistemas “vacíos” de los cuales los grandes animales hayan desaparecido y, con ellos, las funciones ecológicas que cumplían, un fenómeno ya observado en varios bosques tropicales del mundo [5]. Entre las funciones ecológicas que pueden perderse con la pérdida de los mamíferos está, por ejemplo, la dispersión de semillas, afectando así a la composición y estructura

de los bosques a largo plazo [16]. La pérdida de estas funciones puede darse aun sin la completa desaparición de las especies de mamíferos, si sus poblaciones son demasiado pequeñas estas especies no podrán interactuar significativamente con el resto de elementos del ecosistema y estarán “ecológicamente extintas” [5].

La metodología no invasiva utilizada fue fundamental para asegurar la confiabilidad de los resultados de esta investigación. Al causar el menor impacto posible a individuos y poblaciones con una alta sensibilidad a la presencia humana como resultado de una continua presión de cacería, logramos registrar una muestra representativa de la diversidad de mamíferos en las zonas de estudio. Obtuvimos también datos preliminares de la abundancia relativa de las especies y de sus patrones de actividad diaria y estacional. Es importante destacar que la especie más abundante fue la guanta *Dasyprocta fuliginosa*, un roedor de mediano tamaño que no suele ser cazado donde todavía existen poblaciones de guanta *Agouti paca*, un roedor más grande y de carne más apreciada. En lugares donde la población de guanta ha disminuido significativamente, la cacería se centra en la guanta [9]. En la segunda fase de esta investigación, iniciada en abril de 2008, estudiaremos los mamíferos de zonas históricamente más afectadas por la cacería en tierras Secoya para determinar cuál es la abundancia relativa de estas dos especies de roedores en los hábitats más degradados y comparar estos nuevos resultados con los presentados ahora.

El carácter participativo de la investigación, en la cual los datos fueron recopilados y analizados por parabiólogos Secoya a lo largo de aproximadamente un año, ha facilitado la toma de conciencia sobre los impactos negativos de la cacería. En nuestro trabajo con la nacionalidad Secoya, hemos podido constatar la gran importancia que ellos dan al material fotográfico y de su impacto positivo para atraer la atención de las personas hacia las especies registradas. Este impacto es una base importante para actividades de sensibilización y educación ambiental y fue reforzado con la publicación de algunos resultados de este estudio en el libro “Caminando en el sendero, hacia la conservación del ambiente y la cultura Secoya” [11]. Los nuevos resultados que obtendremos en la segunda fase de este estudio y que compararán la diversidad de mamíferos en áreas con diferente presión de cacería, tanto en el pasado como en el presente, facilitarán a los miembros de la Nacionalidad Secoya desarrollar un programa de manejo de cacería eficaz y adecuado a su realidad ambiental y cultural.

Agradecimientos

Agradecemos a Pablo Yépez por su constante apoyo y motivación y a todos los parabiólogos Secoya por su valioso trabajo en este estudio, a Alfredo, Patricio, Magali, Jenny, Margot, César, Gustavo, Néiser, Lidia, Nancy, Erico, Roberto, Gilberto, Ailmer, Maribel, Mireya, Bartolo, Manolo, Olivero, José Euclides y Mariela, muchas gracias. Esta investigación fue financiada por el EcoFondo/FAN, Fundación VIHOMA

y Proyecto CAIMAN/USAID, con el permiso de investigación del Ministerio del Ambiente No. 001-IC-FAU-DRSO-MA-2006.

Referencias bibliográficas

1. Kinnaird, M.F.; Sanderson, E.W.; O'Brien, T.G.; Wibisono, H.T.; Woolmer, G. 2003. Deforestation Trends in a Tropical Landscape and Implications for Endangered Large Mammals. *Conservation Biology* 17: 245-257
2. Main, M. B.; Richardson, L. W. 2002. Response of wildlife to prescribed fire in southwest Florida pine flatwoods. *Wildlife Society Bulletin* 30: 213-221
3. Te Wong S.; Servheen, C.; Ambu, L.; Norhayati, A. 2005. Impacts of fruit production cycles on Malayan sun bears and bearded pigs in lowland tropical forest of Sabah, Malaysian Borneo. *Journal of Tropical Ecology* 21: 627-639
4. Peres, C.A. 1990. Effects of Hunting on Western Amazonian Primate Communities. *Biological Conservation* 54(1): 47-59
5. Redford, K. 1992. The empty forest. *Bioscience* 42: 412-422
6. Redford, K.; Robinson, J.G. 1987. A game of choice: patterns of indian and colonist hunting in the Neotropics. *American Anthropologist* 89: 650-667
7. Cincotta, R.P.; Wisnewski, J.; Engelman, R. 2000. Human population in the biodiversity hotspots. *Nature* 404: 990-992
8. WCS 2006. Efectos de las carreteras sobre la fauna silvestre en el Parque Nacional Yasuní.. WCS Programa Ecuador. Boletín 1
9. de la Torre, S.; Payaguaje, H.; Payaguaje, P.; Payaguaje, A. 2007. Investigación participativa y conservación de la fauna en tierras Secoya. En: *Caminando en el sendero, hacia la conservación del ambiente y la cultura Secoya*. S. de la Torre y P. Yépez (eds). Fundación VIHOMA. Quito. pp. 77-90
10. Pinto, L.C.; Andriolo, A. 2005. Camera traps used on the mastofaunal survey of Araras Biological Reserve, IEF-RJ. *Revista Brasileira Zoociências* Juiz de Fora 7: 231-246
11. de la Torre, S., Yépez, P. (eds). 2007. *Caminando en el sendero, hacia la conservación del ambiente y la cultura Secoya*. Fundación VIHOMA. Quito.
12. Palacios, W.; Cerón, C.E.; Valencia, R.; Sierra, R. 1999. Las Formaciones Naturales de la Amazonia del Ecuador. En: *Propuesta Preliminar de un Sistema de Clasificación de Vegetación para el Ecuador Continental*. R. Sierra (ed.). Quito. pp. 109-119
13. Emmons, L.H.; Feer, F. 1990. *Neotropical rainforest mammals, a field guide*. 1era. Edición. The University of Chicago Press, Chicago
14. Tirira D. 1999. *Mamíferos del Ecuador*. Museo de Zoología (QCAZ) / Centro de Biodiversidad y Ambiente / Pontificia Universidad Católica del Ecuador / SIMBIOE. Quito
15. Vickers, W. 1989. Los *Sionas y Secoyas*, su adaptación al ambiente amazónico. Editorial Abya-Yala, Quito
16. Howe, H.F. 1984. Implications of seed dispersal by animals for tropical reserve management. *Biological Conservation* 30: 261-281

ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE LLEGADA EN UN CANAL RAYLEIGH DESDE UNA PERSPECTIVA DE LA COTA INFERIOR DE CRAMER-RAO

René P. Játiva E.^{*1} Josep Vidal M.²

1 Colegio de Ciencias e Ingeniería, USFQ.

2 Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cataluña.

Resumen

Este documento presenta un modelo utilizado para el estudio de los parámetros de interés que modifican la precisión en la estimación del instante de Tiempo de Arribo (TOA) de la señal emitida por un suscriptor móvil que opera en un sistema en acceso múltiple por división en código (CDMA) que hace uso de un receptor RAKE como parte de su operación. Este modelo se ajusta a sistemas tales como IS-95, CDMA 2000 o WCDMA, para señales que se propagan en condición Rayleigh. Este trabajo muestra el desempeño del receptor en función del número de estimaciones de canal disponibles, el número de sensores que conforman el arreglo de antenas y el tipo de fuente de señal cuando la tasa de muestreo es superior a la tasa de chip. La señal recibida se modela a partir de distribuciones estocásticas, y se consideran tanto los casos de fuentes distribuidas parcialmente coherentes, como los casos de fuentes completamente coherentes y completamente incoherentes.

Palabras Clave. Cramer-Rao Bounds (CRB), CDMA, Rayleigh Channel, RAKE receiver.

Introducción

Los sistemas de posicionamiento de suscriptor móvil han adquirido gran relevancia en la última década debido al gran potencial que presentan para la provisión de una nueva gama de servicios basados en localización (LBS), sobretodo en sociedades donde la penetración de usuarios móviles es superior al 60%, tales como las encontramos en América del Norte y Europa por ejemplo, donde según varios reportes el gasto que realizan los usuarios en LBS totalizaron sumas de alrededor de doscientos millones de dólares a finales de 2006.

Si bien es cierto que los esquemas de posicionamiento de unidades móviles en general pueden clasificarse como basados en red y basados en GPS, son muy variadas las técnicas que pueden aplicarse dentro del primer grupo, siendo las más importantes las técnicas basadas en la estimación de la Diferencia de los instantes de Tiempo de Arribo Observados (OTDOA), de forma que incluso se ha estandarizado el uso de esta técnica para sistemas móviles de Tercera Generación.

Un componente fundamental en sistemas móviles que operan con Acceso Múltiple por División de Código (CDMA) es el receptor RAKE que permite identificar las componentes de señal originadas en propagación multitrayecto, y posibilita su aprovechamiento en términos de diversidad.

Los resultados mostrados en este artículo asumen que el proceso de estimación del primer retardo se hace para un sistema CDMA que utiliza un receptor RAKE, y que el proceso de estimación del primer retardo es el mejor posible. En efecto se estudia el impacto que se tiene sobre la precisión en la estimación del TOA para el primer retardo en función de parámetros tales como: el

número de estimaciones de canal disponibles, el número de sensores que constituyen el arreglo de la antena, el grado de coherencia temporal en las estimaciones de canal que se utilizan para el proceso de estimación de TOA y el período de muestreo cuando éste se realiza a una velocidad mayor que la tasa de chips del sistema.

Materiales y métodos

Este trabajo está muy relacionado con otro anterior, en el que se estudió el impacto de varios de estos parámetros pero bajo el supuesto de que la tasa de muestreo de la señal se realizaba a la tasa de chip [1].

Para este estudio se considera una señal dispersa caracterizada estocásticamente, y el error en la estimación del instante de llegada (TOA) se calcula utilizando la Cota Inferior de Cramer-Rao (CRB) a partir del modelo de señal que describe el escenario móvil.

El modelo toma en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Se asume que el canal tiene un tiempo de coherencia para las amplitudes que siguen las expresiones de Jake usuales, sin embargo el tiempo de coherencia de retardos y ángulos de llegada es mucho mayor, siendo posible obtener muchas estimaciones de canal a objeto de mejorar la precisión de las estimaciones de TOA.
2. El ruido presente en las estimaciones de canal es blanco y gaussiano.
3. El ruido es incoherente en retardo y ángulo, lo cual corresponde a una situación en la cual el suscriptor móvil se mueve y los diferentes rayos reflejados experimentan desvanecimiento rápido incorrelado.

4. Se asumen un modelo lineal de Markov de primer orden para la variación temporal en el canal.
5. Un espectro de potencia continua se utiliza para modelar la función de densidad marginal de retardo, y se asume que esta se ajusta a una exponencial según se propone en Pedersen [2], y se la estima a una fracción del tiempo de chip. Se asume también la misma distribución angular para todos los retardos.

Este modelo es muy conveniente para propósitos de localización puesto que interesa calcular tan solo algunos parámetros de interés en lugar de todos los retardos, lo que complicaría el modelo innecesariamente y tornaría su solución demasiado complicada en escenarios altamente dispersivos.

Modelo De Canal

El vector de canal, $\mathbf{z}^{(i)}(k)$, para un sensor particular “j” y un lag “k” puede modelarse en términos del coeficiente correspondiente con el cual la señal firma sobre el arreglo de sensores en la antena, $\mathbf{b}_j$, la potencia estimada para el trayecto recibido, P_i , su frecuencia Doppler normalizada f_i , y el vector correspondiente al pulso conformador $\mathbf{g}^{(i)}$; además de una componente de ruido $\mathbf{w}^{(i)}(k)$, donde k_0 corresponde al instante de muestreo para el primer retardo.

$$\mathbf{z}^{(j)}(k) = \sum_{i=k_0}^N b_j P_i e^{j2\pi f_i k} \mathbf{g}^{(i)} + \mathbf{w}^{(j)}(k) \quad (1.1)$$

El vector $\mathbf{g}^{(i)}$ contiene las muestras del pulso conformador, siendo “i” la posición de su máximo, $g_p(0)$, y se muestra en (1.2).

$$\mathbf{g}^{(i)} = [g_p \quad -i+1 \quad \cdots \quad g_p \quad 0 \quad \cdots \quad g_p \quad N-i]^T \quad (1.2)$$

Si el vector de canal, $\mathbf{z}^{(i)}(k)$, y su correspondiente vector de ruido se arreglan como se muestra en (1.3), tanto la señal como el ruido pueden describirse como procesos aleatorios Gaussianos de media cero y con ciertas matrices de correlación como se indica en (1.4). Se asume que el ruido es temporalmente incorrelado, independiente de la señal y de varianza σ_w^2 . La matriz de correlación para las estimaciones del vector de canal, $\mathbf{R}_z$, puede expresarse en términos de sus componentes temporal y espacial, como se muestra en (1.5). En esta expresión, el factor de potencia de la señal P_s , se refiere a la varianza de la potencia recibida estimada para el primer retardo de la señal temporalmente dispersa en el caso de propagación Rayleigh; la matriz de conformación de pulso, $\mathbf{G}_s(\beta)$, modela la contribución del pulso conformador, mientras que $\mathbf{\Lambda}_\tau$ es una matriz diagonal que modela la dispersión temporal de la señal y su distribución de potencia exponencial. Por otro lado, la matriz de correlación temporal, $\mathbf{T}(\alpha)$, toma en consideración la variación temporal del canal, y se asume idéntica para todos los retardos; la matriz de

correlación espacial, $\mathbf{R}_\rho(\rho)$, contiene los coeficientes de correlación para las firmas entre sensores, y $\otimes$ denota el producto de Kronecker.

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_1^1 & 1 & \cdots & w_N^1 & 1 & \cdots \\ \cdots & w_1^1 & k & \cdots & w_N^1 & k \\ \cdots & w_1^1 & K & \cdots & w_N^{N_s} & K \end{bmatrix}^T \quad (1.3)$$

$$\mathbf{w} \sim CN(\mathbf{0}, \sigma_w^2 \mathbf{I}), \quad \mathbf{z} \sim CN(\mathbf{0}, \mathbf{R}_z) \quad (1.4)$$

$$\mathbf{R}_z = \mathbf{R}_\rho(\rho) \otimes \mathbf{T}(\alpha) \otimes P_s \mathbf{G}_s(\beta) \mathbf{\Lambda}_\tau(\lambda_n) \mathbf{G}_s^H(\beta) + \sigma_w^2 \mathbf{I} \quad (1.5)$$

La ecuación (1.6) muestra el modelo exponencial usado para los retardos, en términos de la posición del primer arribo, k_0 , y del inverso de la dispersión de retardos normalizado para el tiempo de chip, λ_n .

$$\mathbf{\Lambda}_\tau(\lambda_n)_{k,k} = \exp[-(k - k_0) \lambda_n] \quad (1.6)$$

La matriz de correlación espacial, $\mathbf{R}_\rho(\rho)$ se modela como en (1.7), $\mathbf{T}(\alpha)$ como un proceso auto-regresivo (AR) de primer orden, como se muestra en (1.8); y la forma general para $\mathbf{G}_s$ se exhibe en (1.9). α es el coeficiente de correlación temporal entre dos vectores de canal consecutivos, y ρ_{ij} es el coeficiente de correlación entre los sensores “i” y “j”. Note también que $\mathbf{G}_s$ corresponde a la matriz identidad cuando el muestreo se realiza a la tasa de chips.

$$\mathbf{R}_\rho(\rho) = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1N_s} \\ \rho_{12}^* & 1 & \cdots & \rho_{2N_s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{1N_s}^* & \rho_{2N_s}^* & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

$$\mathbf{T}(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \cdots & \alpha^{K-1} \\ \alpha & 1 & \cdots & \alpha^{K-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha^{K-1} & \alpha^{K-2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

$$\mathbf{G}_s(\beta) = \frac{1}{\sqrt{T_c(1-\beta/4)}} [\mathbf{g}_{s_1} \quad \mathbf{g}_{s_2} \quad \cdots \quad \mathbf{g}_{s_{N_s}}] \quad (1.9)$$

Observe que cada uno de los vectores de conformación de pulso, $\mathbf{g}_{s_i}$, en (1.9) puede modelarse como en (1.10), donde sus elementos g_k se describen por (1.11). Más aún, β es el factor de roll-off, y N_{spe} corresponde al número de muestras adquiridas por período de chip:

$$\mathbf{g}_{s_i}^T = \begin{bmatrix} g_{-i+1} & \cdots & \underset{\substack{\uparrow \\ i\text{th element}}}{1} & \cdots & g_{N-i} \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

$$g_k = \frac{\text{sinc}\left(\frac{k}{N_{\text{spc}}}\right) \cos\left(\frac{\pi\beta k}{N_{\text{spc}}}\right)}{1 - 2\beta k/N_{\text{spc}}} \quad (1.11)$$

Los elementos de la matriz de correlación espacial, $\mathbf{R}_\phi$, se calculan como se muestra en (1.12):

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{\phi_{n_1, n_2}} &= E \quad b_{n_1} \quad b_{n_2}^* \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\Delta_\phi}} \int_{-\pi}^{\pi} e^{-\frac{\phi - \phi_0}{2\Delta_\phi^2}} e^{-j n_1 - n_2 \pi \sin \phi} d\phi \end{aligned} \quad (1.12)$$

Derivación de las Cotas de Cramer-Rao

Las cotas de Cramer-Rao (CRB) son muy útiles en la cuantificación de los errores que resultan de la estimación de parámetros de un modelo estocástico. Para el modelo en (1.4), (1.5) se define el vector de parámetros, Ψ , en (1.13), donde $\mathbf{p}$ es un vector que contiene las partes reales e imaginarias de los coeficientes de correlación entre sensores, tal como se muestra en (1.14).

$$\Psi = [k_0, \lambda_n, \beta, P_s, \sigma_w^2, \alpha, \mathbf{p}^T]^T \quad (1.13)$$

$$\mathbf{p} = [\rho_{1,\text{Re}}, \dots, \rho_{N_c, \text{Re}}, \rho_{1,\text{Im}}, \dots, \rho_{N_c, \text{Im}}]^T \quad (1.14)$$

En este vector de parámetros, k_0 se refiere al instante de la primera llegada normalizado para el tiempo de chip, T_c ; λ_n es el inverso de la dispersión de retardos normalizado para el intervalo de chip, y los demás parámetros ya han sido definidos antes. El parámetro de interés es precisamente k_0 .

Adicionalmente, note que N_c cuenta el número de coeficientes de correlación espacial y se relaciona con el número de sensores como se muestra en (1.15).

$$N_c = \frac{N_s}{2} N_s - 1 \quad (1.15)$$

Las CRB para este modelo se calculan a partir de la Matriz de Información de Fisher (FIM), cuyos elementos se calculan como se muestra en (1.16) [3]:

$$[\mathbf{F}_\Psi^{LOS}]_{pq} = \text{tr} \left(\mathbf{R}_z^{-1} \frac{\partial \mathbf{R}_z}{\partial \Psi_p} \mathbf{R}_z^{-1} \frac{\partial \mathbf{R}_z}{\partial \Psi_q} \right) \quad (1.16)$$

Si la matriz de correlación espacial, $\mathbf{R}_\phi(\mathbf{p})$, se descompone en términos de sus autovalores, λ_ϕ , y de sus autovectores, $\mathbf{u}_\phi$; y se define $\mathbf{U}_\phi$ como la matriz que contiene los autovectores, y Λ_ϕ como la matriz diagonal que contiene los autovalores, como se exhibe en (1.17); y un procedimiento análogo se utiliza para la matriz de Correlación Temporal, $\mathbf{T}(\alpha)$, como se muestra en (1.18), y se reemplazan estas expresiones en (1.5), es posible encontrar una expresión simplificada para $\mathbf{R}_z^{-1}$, que se muestra en (1.19).

$$\mathbf{R}_\phi = \mathbf{U}_\phi \Lambda_\phi \mathbf{U}_\phi^H$$

$$\mathbf{U}_\phi = [\mathbf{u}_\phi^{(1)}, \mathbf{u}_\phi^{(2)}, \dots, \mathbf{u}_\phi^{(N_s)}] \quad (1.17)$$

$$\Lambda_\phi = \text{diag}[\lambda_\phi^{(1)}, \lambda_\phi^{(2)}, \dots, \lambda_\phi^{(N_s)}]$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{U}_t \Lambda_t \mathbf{U}_t^H$$

$$\mathbf{U}_t = [\mathbf{u}_t^{(1)}, \mathbf{u}_t^{(2)}, \dots, \mathbf{u}_t^{(K)}] \quad (1.18)$$

$$\Lambda_t = \text{diag}[\lambda_t^{(1)}, \lambda_t^{(2)}, \dots, \lambda_t^{(K)}]$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_z^{-1} &= \sum_{k=1}^{N_s} \mathbf{u}_\phi^k \mathbf{u}_\phi^{kH} \otimes \sum_{k_1=1}^K \mathbf{u}_t^{k_1} \mathbf{u}_t^{k_1H} \\ &\quad \otimes \lambda_\phi^k \lambda_t^{k_1} P_s \mathbf{G}_s \Lambda_\tau \mathbf{G}_s^H + \sigma_w^2 \mathbf{I}^{-1} \end{aligned} \quad (1.19)$$

Las derivadas de $\mathbf{R}_z$, respecto a los parámetros en (1.13) toman la forma en (1.20), siendo $\mathbf{A}_i$, $\mathbf{B}_i$ y $\mathbf{C}_i$ las matrices que se contienen en la Tabla 1.

$$\frac{\partial \mathbf{R}_z}{\partial \Psi_i} = \mathbf{A}_i \otimes \mathbf{B}_i \otimes \mathbf{C}_i \quad i = p, q \quad (1.20)$$

Si se reemplazan la expresión para $\mathbf{R}_z^{-1}$ en (1.19), y las derivadas en (1.20) en (1.16), puede demostrarse que la FIM puede calcularse por la expresión (1.21).

i=p,q	Ψ_i	$\mathbf{A}_i$	$\mathbf{B}_i$	$\mathbf{C}_i$
1	k_0	$\mathbf{R}_\phi$	$\mathbf{T}$	$P_s \mathbf{G}_s \frac{\partial \Lambda_\tau}{\partial k_0} \mathbf{G}_s^T$
2	λ_n	$\mathbf{R}_\phi$	$\mathbf{T}$	$P_s \frac{\partial \Lambda_\tau}{\partial \lambda_n}$
3	β	$\mathbf{R}_\phi$	$\mathbf{T}$	$P_s \frac{\partial (\mathbf{G}_s \Lambda_\tau \mathbf{G}_s^T)}{\partial \beta}$
4	P_s	$\mathbf{R}_\phi$	$\mathbf{T}$	$\mathbf{G}_s \Lambda_\tau \mathbf{G}_s^T$
5	σ_w^2	$\mathbf{I}_{N_s}$	$\mathbf{I}_K$	$\mathbf{I}_N$

6	α	$\mathbf{R}_\Phi$	$\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \alpha}$	$P_s \mathbf{G}_s \mathbf{\Lambda}_\tau \mathbf{G}_s^T$
$7:6+N_c$	$\rho_{i-6,Re}$	$\frac{\partial \mathbf{R}_\Phi}{\partial \rho_{i-6,Re}}$	$\mathbf{T}$	$P_s \mathbf{G}_s \mathbf{\Lambda}_\tau \mathbf{G}_s^T$
$7+N_c$ $6+2N_c$	$\rho_{i-6,Im}$	$\frac{\partial \mathbf{R}_\Phi}{\partial \rho_{i-6,Im}}$	$\mathbf{T}$	$P_s \mathbf{G}_s \mathbf{\Lambda}_\tau \mathbf{G}_s^T$

Tabla 1. Resultados de las derivadas de la Matriz de Correlación de Estimaciones de Canal $\mathbf{R}_z$ requeridas en (1.20).

$$\mathbf{F}_\Psi = \sum_{k=1}^{N_s} \sum_{k1=1}^K \mathbf{H}_{k,k1} \mathbf{J}_{\bar{\Psi}} \mathbf{H}_{k,k1}^T + C_1 \mathbf{e}_{N_p}^{(6)} \mathbf{e}_{N_p}^{(6)T} + \sum_{q1=1}^{2N_c} \sum_{q2=1}^{2N_c} C_2^{(q1,q2)} \mathbf{e}_{N_p}^{(6+q1)} \mathbf{e}_{N_p}^{(6+q2)T} \quad (1.21)$$

Donde la FIM para este modelo se relaciona con la FIM calculada para un vector reducido de parámetros que se muestra en (1.22) conforme se indica en (1.23) y (1.24), a través de la matriz $\mathbf{H}_{k,k1}$ que se muestra en (1.25).

$$\bar{\Psi} = [k_0, \lambda_n, \beta, \gamma_{k,k1}, \sigma_w^2]^T \quad (1.22)$$

$$\gamma_{k,k1} = P_s \lambda_\phi^k \lambda_i^{k1} \quad (1.23)$$

$$\mathbf{J}_{\bar{\Psi}} = tr \left(\mathbf{R}_{k,k1}^{-1} \frac{\partial \mathbf{R}_{k,k1}}{\partial \bar{\Psi}_p} \mathbf{R}_{k,k1}^{-1} \frac{\partial \mathbf{R}_{k,k1}}{\partial \bar{\Psi}_q} \right) \quad (1.24)$$

Las derivadas respecto al vector de coeficientes de correlación entre sensores requeridas en (1.25) se calculan como se muestra en (1.26)-(1.28).

$$\mathbf{H}_{k,k1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_\phi^{(k)} \lambda_i^{(k1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & P_s \lambda_\phi^{(k)} \frac{\partial \lambda_i^{(k1)}}{\partial \alpha} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_s \frac{\partial \lambda_\phi^{(k)}}{\partial \rho} \lambda_i^{k1} & 0 \end{bmatrix} \quad (1.25)$$

$$\frac{\partial \lambda_\phi^{(k)}}{\partial \rho} = \left[\frac{\partial \lambda_\phi^{(k)}}{\partial \rho_{1,Re}}, \frac{\partial \lambda_\phi^{(k)}}{\partial \rho_{1,Im}} \right]^T \quad (1.26)$$

$$\frac{\partial \lambda_\phi^{(k)}}{\partial \rho_{Re}} = \left[\frac{\partial \lambda_\phi^{(k)}}{\partial \rho_{1,Re}}, \dots, \frac{\partial \lambda_\phi^{(k)}}{\partial \rho_{N_c,Re}} \right]^T \quad (1.27)$$

$$\frac{\partial \lambda_\phi^{(k)}}{\partial \rho_{Im}} = \left[\frac{\partial \lambda_\phi^{(k)}}{\partial \rho_{1,Im}}, \dots, \frac{\partial \lambda_\phi^{(k)}}{\partial \rho_{N_c,Im}} \right]^T \quad (1.28)$$

El término C_1 requerido en (1.21) modela el efecto del coeficiente de correlación temporal, α , sobre la FIM, como una contribución de la diversidad espacial y temporal, mientras que los términos $C_2^{(q1,q2)}$ corresponden a la contribución de los coeficientes de correlación espacial a la FIM. El vector $\mathbf{e}_v^{(i)}$ se introduce por conveniencia de notación y se muestra en (1.29).

$$\mathbf{e}_v^{(i)} = [0, \dots, 0, \underset{\substack{\uparrow \\ i\text{th element}}}{1}, \dots, 0]^T \quad (1.29)$$

Note en (1.30) - (1.33) como F_1 corresponde a la contribución de las estimaciones temporales y F_2 modela la diversidad temporal y el efecto del pulso conformador.

$$C_1 = -P_s^2 \sum_{k=1}^{N_s} \lambda_\phi^{k^2} \sum_{k1=1}^K \sum_{l1=1}^K F_1^{k1,l1} F_2^{k,k1,l1} \quad (1.30)$$

$$F_1^{k1,l1} = \lambda_i^{(k1)} - \lambda_i^{(l1)}{}^2 \mathbf{u}_i^{(k1)H} \dot{\mathbf{u}}_i^{(l1)} \mathbf{u}_i^{(l1)H} \dot{\mathbf{u}}_i^{(k1)} \quad (1.31)$$

$$F_2^{k,k1,l1} = tr \left(\mathbf{R}_{k,k1}^{-1} \mathbf{G}_s \mathbf{\Lambda}_\tau \mathbf{G}_s^T \mathbf{R}_{k,l1}^{-1} \mathbf{G}_s \mathbf{\Lambda}_\tau \mathbf{G}_s^T \right) \quad (1.32)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_i^{(k1)} = \frac{d\mathbf{u}_i^{(k1)}}{d\alpha} \quad (1.33)$$

Los términos $C_2^{(q1,q2)}$ se definen en (1.34)-(1.36) y se calculan como resultado de la diversidad temporal y espacial. Los términos E_1 corresponden precisamente a la contribución espacial, mientras que los términos E_2 se relacionan con la diversidad temporal debida al receptor RAKE y al efecto del pulso conformador.

$$C_2^{(q1,q2)} = -P_s^2 \sum_{k1=1}^K \lambda_i^{k1^2} \sum_{k=1}^{N_s} \sum_{l=1}^{N_s} E_1^{k,l} E_2^{k1,k,l} \quad (1.34)$$

$$E_1^{k,l} = \lambda_\phi^{(k)} - \lambda_\phi^{(l)}{}^2 \left(\mathbf{u}_\phi^{(k)T} \frac{\partial \mathbf{u}_\phi^{(l)}}{\partial \rho_{q1}} \right) \cdot \left(\mathbf{u}_\phi^{(l)T} \frac{\partial \mathbf{u}_\phi^{(k)}}{\partial \rho_{q2}} \right) \quad (1.35)$$

$$E_2^{k,l,k_1} = \text{tr} \mathbf{R}_{k,k_1}^{-1} \mathbf{G}_s \mathbf{\Lambda}_s \mathbf{G}_s^T \mathbf{R}_{l,k_1}^{-1} \mathbf{G}_s \mathbf{\Lambda}_s \mathbf{G}_s^T \quad (1.36)$$

Las derivadas de los auto-vectores de la matriz de correlación temporal respecto al coeficiente de correlación temporal, α , requeridas en (1.31) se calcularon numéricamente para obtener las cotas de Cramer-Rao en este artículo.

Resultados y discusión

A continuación se presentan algunos resultados de interés que relacionan el error en la determinación del primer retardo con algunos parámetros relevantes del modelo.

Comportamiento del Error en la estimación del Instante de Llegada de la señal (TOA) cuando se utilizan múltiples sensores en diversidad y el vector de canal se muestrea a la tasa de chip.

La figura 1 muestra el comportamiento del error de estimación cuando se utilizan señales de varios sensores. El ejemplo propuesto corresponde a las cotas para un entorno con una dispersión angular de 10° y una dispersión temporal de $2T_c$, cuando se utilizan 4 sensores espaciados $\lambda/2$; el cual bien podría corresponder al caso del enlace ascendente en el que las mediciones se realizan en la estación base (BS). La gráfica revela que la adición de múltiples sensores en el arreglo de la antenna mejora la estimación del primer retardo significativamente. Así se tiene que para una relación señal a ruido de 10 dB, la cota del error en la estimación del primer retardo se reduce desde alrededor de $0,85T_c$ cuando se usa un único sensor hasta aproximadamente la mitad ($0,44T_c$) cuando se emplean cuatro sensores y la fuente de señal se modela como parcialmente coherente

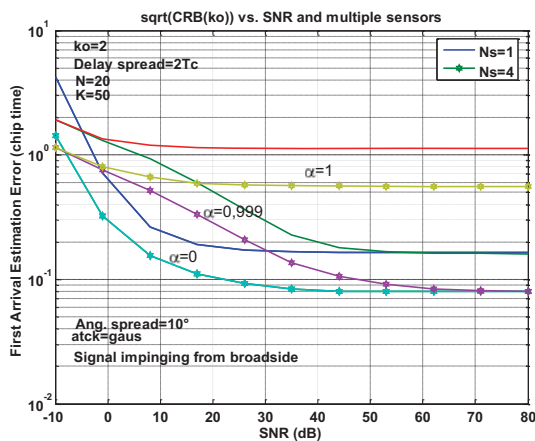


Figura 1. Cotas de Cramer-Rao para el trayecto correspondiente a la primera llegada k_0 en función de la SNR para varios valores del factor de correlación temporal, α . Un sensor (línea sólida) y cuatro sensores (línea sólida-estrella) se usan para una fuente con una dispersión angular de 10° , una dispersión de retardos de $2T_c$ y 50 observaciones del vector de canal.

con un factor de correlación temporal, $\alpha=0,999$. La situación es algo mejor para fuentes de señal incoherentes ($\alpha=0$). En este caso el error se reduce desde aproximadamente $0,23T_c$ cuando se emplea un sensor hasta cerca de la mitad cuando se emplea un arreglo con cuatro sensores. El peor caso corresponde a fuentes de señal completamente coherentes. El error en este caso es de alrededor de $1,2T_c$ para un sensor y se reduce hasta algo más de la mitad cuando se utilizan cuatro sensores.

La dispersión angular no es un aspecto especialmente relevante, a pesar de que el mejor caso corresponde a sensores completamente incorrelados, y que el error de estimación presenta una pequeña reducción conforme la dispersión angular reduce.

Comportamiento del Error en la estimación del Instante de llegada de la señal (TOA) cuando la estimación del vector de canal se realiza a dos veces la tasa de chip.

La figura 2 muestra el comportamiento de la cota del error en la estimación del primer retardo el vector de canal se muestrea a dos veces la tasa de chip, para diferentes valores del factor de roll-off, β , y muestra como una mejoría marginal apenas se alcanza cuando se modifica el factor de roll-off de 0,5 a 1. Por otro lado si estos resultados se comparan con los que se muestran en la figura 1, el error en la estimación de TOA se reduce ligeramente. Así por ejemplo, se observa que para un factor de correlación temporal, α , de 0,999 y cuando se emplea únicamente un sensor, el error en la estimación del primer retardo es de alrededor de $0,85T_c$ para una SNR de 10dB y de alrededor de $0,2T_c$ para una SNR de 40dB, cuando el muestreo se realiza a la tasa de chip, y que este valor reduce a alrededor de la mitad cuando la tasa de muestreo es dos veces más rápida.

La figura 2 muestra que resultados similares se esperan con independencia de la dispersión angular de la fuente de señal. Sin embargo, ligeras ganancias se consiguen cuando la dispersión angular es mayor, especialmente cuando la relación señal a ruido, SNR, es baja. Por ejemplo, el error en la estimación del primer retardo cuando la SNR es de alrededor de 5dB y se emplea una antenna con 4 sensores se reduce desde alrededor de $10^{-1}T_c$ hasta $8 \times 10^{-2}T_c$ cuando la dispersión angular crece desde 5° hasta 18° y se utilizan estimaciones del vector de canal temporalmente incorreladas; y se reduce desde $4 \times 10^{-1}T_c$ hasta alrededor de $3 \times 10^{-1}T_c$ cuando las estimaciones del vector de canal están altamente correladas ($\alpha=0,99999$). En forma similar, el error en la estimación del primer retardo cuando la SNR es de alrededor de 50dB mejora de $10^{-1}T_c$ a $8 \times 10^{-2}T_c$ para el caso en que la fuente de señal está temporalmente muy correlada ($\alpha=0,99999$).

Finalmente, es importante destacar que el error de estimación del primer retardo se mantiene prácticamente

invariante con respecto a la dispersión temporal de la fuente y que la precisión mejora cuando el número de estimaciones de vector de canal disponibles aumenta,

sobretudo cuando la fuente de señal es temporalmente incoherente, es decir para valores bajos de α .

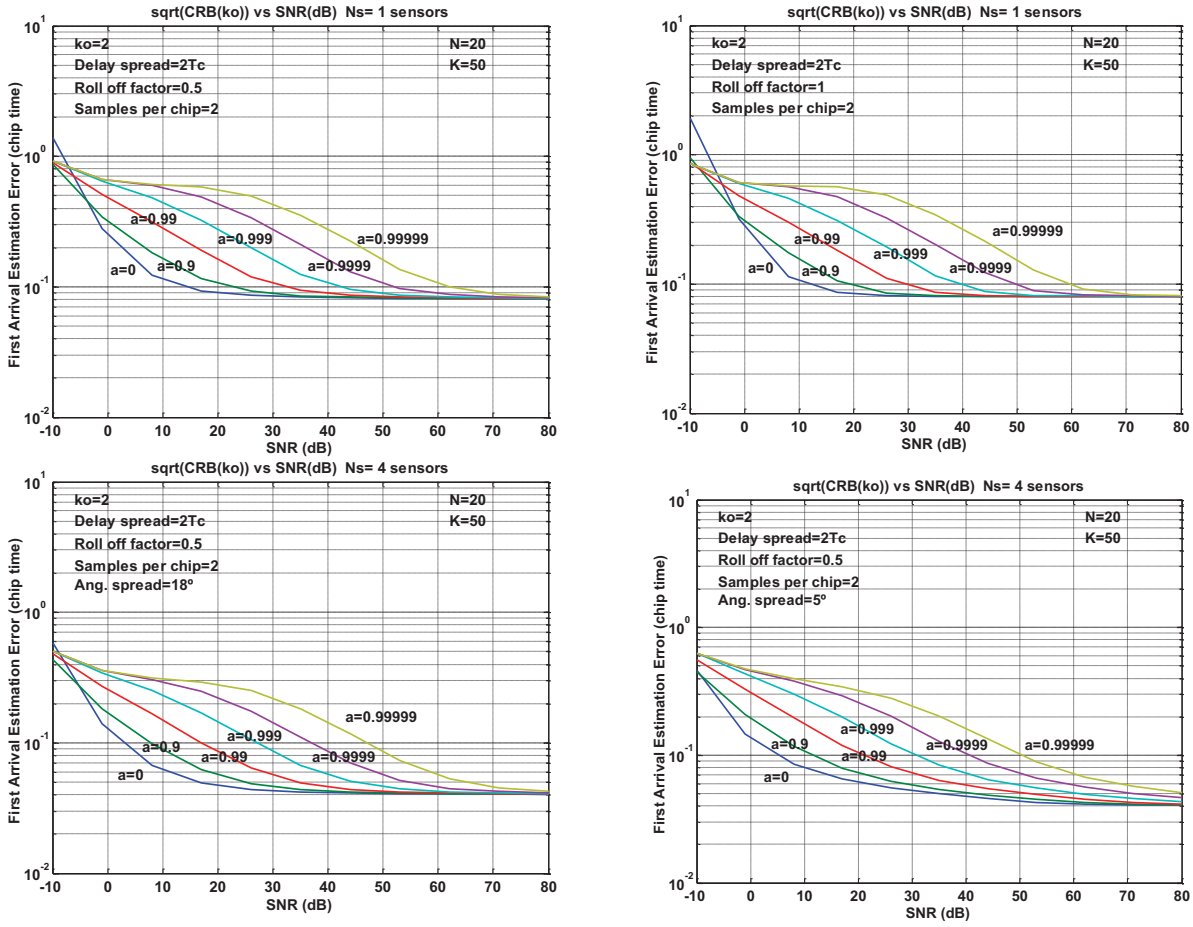


Figura 2: Cotas de Cramer-Rao para al trayecto correspondiente a la primera llegada k_0 en función de la SNR para diversos valores del factor de correlación temporal, α . Dos factores de roll-off se utilizan y se presentan resultados para un sensor y para un arreglo de cuatro elementos dispuestos con una separación de $\lambda/2$. La dispersión temporal es de $2T_c$. A) Superior Izquierda: Un sensor, β de 0.5. B) Superior Derecha: Un sensor, β de 1.0. C) Inferior Izquierda: Cuatro sensores, β de 0.5, y dispersión angular de 18° . C) Inferior Derecha: Cuatro sensores, β de 0.5, y dispersión angular de 5° .

Referencias bibliográficas

1. Játiva, R.; Vidal, J. 2003. "La Cota Inferior de Cramer-Rao en la Estimación del Instante de Llegada al usar Modelos de Fuente Distribuida". Revista CIENCIA Vol.6, N.2, 185-196.
2. Pedersen, K. 2000. "Antenna Arrays in Mobile Communications – Channel Modeling and Receiver Design for DS-CDMA Systems", Tesis Doctoral de la Universidad de Aalborg.
3. Kay, S. 1993. *Fundamentals of Statistical Signal Processing – Estimation Theory*. New Jersey: Prentice Hall.

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA A TRAVÉS DE MACROINVERTEBRADOS BENTÓNICOS E ÍNDICES BIOLÓGICOS EN RÍOS TROPICALES EN BOSQUE DE NEBLINA MONTANO

D. Carolina Arroyo J.* Andrea C. Encalada

Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales, USFQ.

Resumen

Los efectos de la contaminación en ríos de zonas templadas han sido descritos de manera extensa y desde hace varias décadas, mientras existe escasa información de estos efectos en ríos neotropicales. Los macroinvertebrados bentónicos son muy utilizados como bioindicadores de la calidad de fuentes de agua, debido a sus características y requerimientos especiales que hacen a estos organismos muy sensibles a diversos impactos. Se realizó un muestreo de macroinvertebrados bentónicos en los ríos Guajalito, Palmeras y Brincador, los cuales cruzan a través del Bosque Protector Río Guajalito, con el fin de estimar la calidad de las aguas de los mismos y de comparar diversos índices biológicos de calidad de aguas (BMWP, IBMWP, BMWP/Col e índice de Sensibilidad). Además se realizó una caracterización física y química para validar la información biológica obtenida. Las familias más representativas fueron Hydropsychidae, Chironomidae y Helicopsychidae. Se encontraron diferencias significativas en la diversidad y riqueza de invertebrados bentónicos entre los diferentes ríos, y además en las puntuaciones de los diferentes índices biológicos de calidad del agua. El análisis de los diferentes parámetros (físico-químico y biológico) en estos ríos sugieren que los ríos Guajalito y Palmeras tienen aguas ligeras a moderadamente contaminadas y que el río Brincador tiene una calidad óptima de sus aguas. Además, el presente estudio sugiere que el índice biológico que explica mejor sobre la calidad de las aguas en este bosque montano, es posiblemente el BMWP/Col, debido principalmente a que más del 97% de familias de invertebrados encontradas están presentes en el índice. A futuro, es necesario el desarrollo de un índice de calidad biológica para el Ecuador, donde se cubra todo el rango altitudinal y ecosistémico del país, así como las familias de macroinvertebrados comunes en los cuerpos de agua.

Palabras Clave. BMWP, indicadores biológicos, índices biológicos, macroinvertebrados.

Introducción

Las sociedades humanas han usado los ríos, aguas subterráneas y humedales para varias actividades como desarrollo urbano, agricultura, industria entre otras [1], sin tomar en cuenta los efectos negativos y amenazas sobre el ecosistema, diversidad biológica y funcionamiento de los cuerpos de agua corriente [2].

Los macroinvertebrados son uno de los indicadores biológicos más utilizados en la evaluación de ecosistemas fluviales del mundo [3], debido a sus características, requerimientos especiales y adaptaciones evolutivas a determinadas condiciones ambientales, que los convierten en organismos con límites de tolerancia específicos a las diferentes alteraciones de su hábitat [4, 5, 6].

Los métodos que consideran a los macroinvertebrados como indicadores de calidad de agua han sido empleados en Europa por alrededor de un siglo [3, 7, 8]. A raíz de estos trabajos, se han desarrollado alrededor del mundo varios índices o sistemas que relacionan la fauna bentónica con la calidad de las aguas como Biological Monitoring Working Party (BMWP), The River Invertebrate Prediction and Classification System (RIVPACS), el Índice Biótico de Familias (IBF), entre otros [3, 4, 9, 10].

En América Latina se cuenta con pocos estudios puntuales realizados en Venezuela, Colombia, México, Colombia, Ecuador, Bolivia, Argentina y Chile [7]. En algunos casos, como en Colombia y Argentina, se cuenta con adaptaciones e índices biológicos propios [11, 12, 13], aunque aun es común el uso de índices desarrollados para zonas templadas.

En el Ecuador existe poca información relacionada a índices biológicos, taxonomía y metodologías apropiadas para el estudio de fauna bentónica [11, 12, 13]. Además, los macroinvertebrados acuáticos no son empleados oficialmente para la evaluación y monitoreo de la condición de los ríos y arroyos. Algunos estudios han sido realizados localmente en este ámbito, en su mayoría realizados en regiones altas (> 2000 m), siendo muy pocos los estudios para tierras bajas [14].

El objetivo del presente proyecto es evaluar la calidad de las aguas de tres ríos: Palmeras, Brincador y Guajalito, los cuales cruzan por la reserva Bosque Protector Río Guajalito, a través de análisis de comunidades de macroinvertebrados bentónicos. Además, realizar análisis químicos, como complemento del estudio de invertebrados acuáticos y por último, comparar diferentes índices biológicos desarrollados para zonas templadas y tropicales para evaluar su validez en ríos tropicales. La información generada será utilizada a

manera de línea base, para apoyar al manejo y conservación de la reserva, la cual posee una gran riqueza biológica, y donde el sistema fluvial constituye un recurso muy importante del cual dependen no sólo flora y fauna, sino también varias zonas pobladas, quienes utilizan directamente este recurso. Por esta razón se ve necesario desarrollar iniciativas que apoyen la conservación del ecosistema.

Materiales y métodos

Este estudio fue realizado en tres ríos dentro de la reserva privada Bosque Protector Río Guajalito (BPRG) (00° 14' 57''S 78° 48'22''O), se encuentra localizada el

En cada una de las estaciones se realizaron cuatro muestreos de oxígeno disuelto (método Winkler, kit LaMotte), temperatura y pH (medidor de pH, Hanna Instruments 8519). Además, conductividad (Medidor OAKTON TDS) y sólidos totales (Medidor OAKTON TDS testr).

El ancho y la profundidad del río, y la caracterización de sustrato se registraron escogiendo tres transectos al azar dentro de cada estación. La profundidad y sustrato se midieron en cinco puntos en cada transecto. Los tipos de sustrato mineral fueron clasificados de acuerdo a las categorías de arena (< 2 mm de diámetro), grava (2 - 64 mm de diámetro), piedras (65 – 256 mm de diámetro) y

Río	Profundidad (m)			Ancho (m)			Velocidad (m/s)			Volumen (m/s ²)			Sustrato
	Media	Min	Max	Media	Min	Max	Media	Min	Max	Media	Min	Max	
G	0,20	0,08	0,38	5,1	3,2	8,2	0,36	0,28	0,43	0,48	0,27	0,7	14/23/40/23
P	0,25	0,12	0,44	7,3	6,0	8,5	0,31	0,29	0,34	0,56	0,55	0,57	10/20/40/30
B	0,17	0,04	0,38	4,9	4,3	5,2	0,34	0,28	0,41	0,29	0,22	0,36	20/23/34/23

Tabla 1. Valores medios y rango (mínimo-máximo) de características físicas de los ríos Guajalito (G), Palmeras (P) y Brincador (B). Sustrato (%arena/%grava/%canto s/%bloques). BPRG, Ecuador.

Río	Temperatura (°C)			pH		Oxígeno Disuelto (mg/l)			Conductividad (µS)			Sólidos Totales (ppm)	
	Media	Min	Max	Min	Max	Media	Min	Max	Media	Min	Max	Media	
G	14,3	14,0	15,0	6,1	6,3	10,2	9,5	10,9	58,8	50,0	60,0	30,0	
P	15,8	15,0	17,0	6,3	6,4	10,1	10,0	11,0	55,0	50,0	60,0	30,0	
B	14,4	13,5	15,0	6,2	6,3	9,8	9,3	11,0	30,0	30,0	30,0	20,0	

Tabla 2. Valores medios y rango (mínimo-máximo) de características físico-químicas de los ríos Guajalito (G), Palmeras (P) y Brincador (B). BPRG, Ecuador.

kilómetro 59 de la antigua vía Quito – San Juan – Chiriboga – Santo Domingo de los Colorados, Provincia de Pichincha [15]. De acuerdo a Sierra y Holdridge, la reserva corresponde al ecosistema calificado como Bosque de Neblina Montano que la convierte en una región importante de provisión fuentes de agua [15]. A través de la reserva cruza también el Sistema de Oleoducto TransEcuatoriano (SOTE).

Se establecieron seis estaciones de muestreo, dos en cada uno de los ríos: Guajalito (G1 y G2), Palmeras (P1 y P2) y Brincador (B1 y B2). Cada estación comprendió un tramo de 10 m de longitud sobre el río y en cada una de ellas se registraron las coordenadas geográficas (GPS Garmin 12XL), así como la altitud (altímetro SUUNTO E203).

rocas (> 256 mm de diámetro) [16].

Para los muestreos de fauna bentónica se utilizó de una red Surber de 0,3 m² de superficie, con red de 500 micras. En cada una de las estaciones, se realizaron de manera aleatoria cuatro muestreos o réplicas con duración de un minuto.

Una vez separados, los macroinvertebrados fueron identificados con un estereoscopio Olympus SZ40 a magnificación de 10x – 40x. La identificación fue realizada hasta el nivel taxonómico de Familia, utilizando diversas claves taxonómicas para invertebrados acuáticos, como Roldan-Pérez 1988 y Merritt y Cummins 1996.

En base a los invertebrados acuáticos encontrados en cada estación de muestreo, se calcularon los índices biológicos: BMWP (Biological Monitoring Working Party) [16], IBMWP [4], BMWP/Col [10] y de Sensibilidad.- Índice basado en el IBMWP/Col [19] para analizar biológicamente la calidad del agua de estos ríos (ver detalle de los índices en [20]). Además, se evaluó la diversidad de las familias encontradas en los ríos del BPRG a través del índice de diversidad de Shannon (H') y Simpson (S).

Las variables físico-químicas y biológicas fueron examinadas a través de Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía, en caso de no presentar distribución normal, las variables fueron analizadas con pruebas no paramétricas, como Kruskal Wallis (MINITAB, versión 12.2). Además, se realizaron correlaciones de Pearson (MINITAB) para medir las correlaciones entre las variables físico-químicas y la abundancia relativa de macroinvertebrados y riqueza de familias.

Resultados y discusión

Los ríos Guajalito y Palmeras presentaron características muy similares en cuanto a sus características físico-químicas (Tabla 1), mientras que el río Brincador difiere ligeramente de los anteriores, especialmente en los valores de conductividad ($F_{2,21}=142,74$; $P=0,0001$) y sólidos totales (Kruskal Wallis $H=15,360$; $DF=2$; $P=0,0005$) (Tabla 2). Estas diferencias entre los cuerpos de agua puede deberse a que los ríos G y P se encuentran rodeados por una relativa mayor concentración de asentamientos humanos, las cuales pueden encontrarse vertiendo desechos orgánicos, fertilizantes o pesticidas provenientes de actividades domésticas, agrícolas o ganaderas, afectando de esta manera a los valores de conductividad del agua. No obstante, los valores de conductividad en los tres ríos son bajos y están dentro de los estándares permisibles [13].

De igual manera con los valores de sólidos totales disueltos en el agua se encuentran en menor concentración en el río B (Tabla 2). Los sólidos totales en suspensión se encuentran directamente relacionados con la turbidez, la cual puede ser provocada por efecto de la erosión de las riberas de los ríos debido a la deforestación de los bosques ribereños [18] y que representa un problema a los ecosistemas acuáticos al restar el ingreso de luz solar provocando disminución de la producción primaria (crecimiento de algas), así como la sedimentación de partículas que pueden destruir los hábitats acuáticos. Probablemente, el río B al contar con un menor número de personas alrededor tiene un menor

ORDEN	FAMILIA	G	P	B
Hidracarina	Hidracarina	9	7	6
	Elmidae	238	204	322
Coleoptera	Gyrinidae	-	-	4
	Psephenidae	8	18	77
	Ptilodactylidae	4	1	6
Colembolla	Colembolla	-	1	-
	Ceratopogonidae	22	37	12
	Chironomidae	522	957	305
Diptera	Empididae	103	81	349
	Simuliidae	48	59	19
	Tabanidae	4	4	-
	Tipulidae	15	18	6
	Baetidae	300	90	133
Ephemeroptera	Leptohyphidae	100	297	381
	Leptophlebiidae	-	35	45
	Oligoneuridae	-	-	4
Hemiptera	Naucoridae	-	-	6
	Vellidae	2	1	2
Lepidoptera	Pyrilidae	12	7	6
Megaloptera	Corydalidae	27	51	5
	Calopterygidae	-	1	2
Odonata	Gomphidae	11	2	8
	Libellulidae	-	1	1
Plecoptera	Perlidae	7	-	18
	Glossosomatidae	42	42	20
	Helicopsychidae	452	614	532
Trichoptera	Hydropsychidae	886	345	590
	Hydroptilidae	15	-	53
	Leptoceridae	28	45	117
Total		2855	2918	3029

Tabla 3. Número de individuos de cada taxa colectados en los ríos Guajalito (G), Palmeras (P) y Brincador (B) en el BPRG Ecuador.

grado de deforestación de bosques de ribera, dando resultando así menor probabilidad de erosión y menor concentración de partículas de sólidos en suspensión.

La comunidad de invertebrados acuáticos de los ríos G, P y B fue numerosa y diversa con 8807 individuos ($4077,3 \text{ ind/m}^2$), distribuidos en 10 órdenes y 29 familias (Tabla 3), de las cuales 28 corresponden a familias de insectos. A nivel de órdenes, los más representativos fueron Trichoptera (44%), seguido por Diptera (29%) y Ephemeroptera (16%). Las familias más abundantes fueron Hydropsychidae (Trichoptera) (21%), seguida de Chironomidae (Diptera) (20 %) y Helicopsychidae (Trichoptera) (17%).

Los organismos de la familia Hydropsychidae son considerados como indicadores de aguas oligotróficas ya que pueden resistir poca contaminación [10]. Por otro lado, la familia Chironomidae se caracteriza por organismos indicadores de aguas mesotróficas, debido a su resistencia a contaminación [10]. Por último, la familia Helicopsychidae, corresponden a organismos indicadores de aguas meso-oligotróficas [10]. Cabe recalcar que dos de las tres familias más abundantes, pertenecen al orden Trichoptera, el cual es considerado buen indicador de calidad de aguas, debido a la sensibilidad de dichos organismos ante la contaminación, al igual que los órdenes Ephemeroptera y Plecoptera.

En cuanto a diversidad de invertebrados, no existieron diferencias significativas entre los ríos G, P y B al utilizar el índice de diversidad de Simpson (S). Sin embargo, el índice de diversidad de Shannon H' difirió significativamente entre G, P y B (Kruskal Wallis $H=7,48$; $DF=2$; $P=0,023$), donde el río B presentó la mayor diversidad.

En referencia a los índices biológicos, existieron diferencias significativas entre los ríos G, P y B para los índices BMWP ($F_{2,21}=9,253$; $P=0,001$), IBMWP ($F_{2,21}=5,287$; $P=0,014$), BMWP/Col ($F_{2,21}=4,78$; $P=0,02$) e Índice de Sensibilidad ($F_{2,21}=3,729$; $P=0,0411$), siendo el río B donde se

Calidad	Puntaje	Significado	Color
Buena	>150, 101-120	Aguas muy limpias a limpias	Azul
Aceptable	61-100	Aguas ligeramente contaminadas	Verde
Dudosa	36-60	Aguas moderadamente contaminadas	Amarillo
Critica	16-35	Aguas muy contaminadas	Naranja
Muy Critica	<15	Aguas fuertemente contaminadas	Rojo

(a)

Río	BMWP	IBMWP	BMWP/Col	Sensibilidad
Guajalito	45,75 ($\pm 11,93$)	60,25 ($\pm 14,84$)	93,13 ($\pm 24,63$)	73,38 ($\pm 22,70$)
Palmeras	47,56 ($\pm 11,40$)	67,33 ($\pm 12,09$)	105,9 ($\pm 15,09$)	85,75 ($\pm 11,36$)
Brincador	64,78 ($\pm 7,726$)	79,56 ($\pm 10,11$)	121,4 ($\pm 15,34$)	95,50 ($\pm 12,13$)

(b)

Tabla 4. (a) Significado e interpretación de valores de índices biológicos BMWP, IBMWP, BMWP/Col y de Sensibilidad (b) Puntajes medios y desviación estándar (entre paréntesis) de puntajes de índices biológicos BMWP, IBMWP, BMWP/Col y de Sensibilidad para los ríos Guajalito, Palmeras y Brincador.

La familia Oligoneuriidae del orden Ephemeroptera fue registrada en el río B, mas no en los ríos G y P. Esta familia es considerada muy sensible a la contaminación y corresponde a un indicador de aguas limpias [10]. Esto puede ser un indicio de que la calidad del agua del río B es superior a la de los ríos G y P, cuya contaminación no sólo es causada por presencia humana y de ganado, si no también por vertidos de desechos o pesticidas y por actividades piscícolas. Además el río G, ha recibido derrames de petróleo y diesel cuyos residuos aún pueden continuar ligados o alojados en el sustrato o en el acuífero, afectando a organismos extremadamente sensibles.

La riqueza de familias varió significativamente en los ríos G, B y P ($F_{2,21}=4,25$; $P=0,02$), siendo el río B donde se registró la mayor riqueza a nivel de familia, además la riqueza de familias se correlacionó inversamente de forma significativa con la conductividad (Pearson $r=-0,42$, $p=0,04$) y con los sólidos totales ($r=-0,43$, $p=0,04$). La presencia de un mayor número de familias en el río B, al igual que la asociación negativa entre riqueza de familias y los parámetros de conductividad y sólidos totales refuerza la idea que el río B tiene una mejor calidad de agua que los ríos G y P.

obtuvieron los mayores puntajes (Tabla 4). El río B obtuvo los valores más elevados para los índices BMWP, tanto para la versión original, como para las adaptaciones ibérica y colombiana y para el índice de Sensibilidad, coincidiendo así con los resultados anteriores (parámetros físico-químicos y biológicos) y también con el gradiente de impacto humano que observamos en estos ríos.

Sin embargo, es importante recalcar que se puede llegar a conclusiones ligeramente diferentes en cuanto a calidad de agua, dependiendo del tipo de índice biológico que se utilice. Por ejemplo, de acuerdo a la puntuación del BMWP en su versión original, los ríos G y P poseen aguas con calidad dudosa y B con calidad aceptable (Tabla 4). Por otro lado, el índice IBMWP califica a G, P y B como ríos de calidad aceptable al igual que el índice de Sensibilidad. El índice IBMWP/Col califica al río G como aceptable, mientras que a los ríos P y B los clasifica como buenos.

Esta no concordancia de los diferentes índices se puede deber a que de las 29 familias registradas, la versión original del BMWP incluyó 14 familias (48,28%) de invertebrados, la versión ibérica de este índice incluyó

24 familias (82,76%), la versión colombiana incluyó 28 familias (97%) y finalmente el índice de sensibilidad incluyó 18 familias (62,1%). La poca inclusión de familias de invertebrados en los índices BMWP e IBMWP probablemente causó la clasificación de la calidad del agua de los ríos como dudosa, cuando éstos estuvieron clasificados como aguas de calidad aceptable según el BMWP/Col. Estos índices antes mencionados han sido ampliamente utilizados en zonas tropicales (referencia), a pesar de haber sido desarrollados para ríos que presentan condiciones naturales y de diversidad completamente diferentes.

A pesar de que el Índice de Sensibilidad fue adaptado para Ecuador, probablemente es demasiado “local” y solamente incluye familias de macrobentos que se encuentran en zonas bajas de la costa Ecuatoriana [19], y al haber sido creado originalmente para el uso de poblaciones humanas locales posee solo las familias más representativas y hasta cierto punto sencillas de reconocer, lo que lo vuelve menos preciso.

El presente estudio sugiere que el índice biológico que explica más sobre la calidad de las aguas en este bosque montano del Ecuador, es posiblemente el BMWP/Col [10], debido principalmente a que la gran mayoría de las familias encontradas si están presentes en el índice y por lo tanto tienen un valor asociado en cuanto a contaminación. Sin embargo, es sumamente importante el desarrollo de un índice de calidad biológica del agua para el todo el Ecuador, donde se reflejen las condiciones naturales, ecosistémicas y altitudinales del país, así como la fauna de macroinvertebrados que se encuentran distribuidos en zonas tropicales. Es prioritario que los organismos encargados del monitoreo de la calidad de agua en el Ecuador, incorporen variables biológicas en su monitoreo, ya que estas toman en cuenta criterios de integridad ecológica de ecosistemas lóticos.

El análisis de los diferentes parámetros en estos tres ríos en bosque montano sugieren que los ríos Guajalito y Palmeras tienen aguas ligera a moderadamente contaminadas y que el río Brincador tiene una calidad óptima de sus aguas. Se recomienda realizar un muestreo más extenso e intensivo para estos tres ríos, donde se incluya una mayor variedad de hábitats, parámetros ambientales y condiciones climáticas (época seca y húmeda), con el fin de complementar la información generada por la presente investigación, y así contar con una herramienta fuerte y más completa para el manejo de las cuencas hidrográficas de la reserva.

Agradecimientos

Agradezco la invaluable ayuda y apoyo de Stella de la Torre, Nelson Zabala, Vlastimil Zak, Javier Robayo, cuya colaboración fue muy importante para la realización de este estudio, además las facilidades

brindadas en el Laboratorio de Ecología Acuática de la Universidad San Francisco de Quito.

Referencias bibliográficas

1. Baron, J.; Poff, N.; Angermeier, P.; Dahm, C.; Gleick, P.; Hairston, N.; Jackson, R.; Johnston C., Richter, B.; Steinman, A. 2002. “Meeting ecological and societal needs for freshwater”, *Ecological Applications*, 12: 1247-1260
2. Allan, J.; Flecker, A. S. 1993. “Biodiversity conservation in running waters”. *BioScience*, 43: 32-34.
3. Figueroa, R.; Araya, E.; Parra, O.; Valdovinos C. 2003. “Invertebrados bentónicos como indicadores de calidad de agua”, Centro de Ciencias Ambientales, EULA-Chile.
4. Alba-Tercedor, J. 1996. “Macroinvertebrados acuáticos y la calidad de las aguas de los ríos”, IV simposio del Agua de Andalucía (SIAGA), Vol II, 203-213. Almería, España.
5. Zúñiga de Cardoso, M.C. 2001. “Los insectos como bioindicadores de calidad del agua”, Primer Congreso Colombiano de zoología, Bogotá, Colombia.
6. Pino, W.; Mena, D.; Mosquera L.; Caicedo P.; Palacios, J.; Castro A.; Guerrero J. 2003. “Diversidad de macroinvertebrados y evaluación de la calidad de agua de la quebrada La Bendición, Municipio de Quibdó (Chocó, Colombia)”, *Acta biológica Colombiana*, vol 8, 23.
7. Segnini, S. 2003. “El Uso de los macroinvertebrados benthónicos como indicadores de la condición ecológica de los cuerpos de aguacorrente”, *Ecotrópicos*, 16: 45-63.
8. Rosenberg, D.; Davies, J.; Cobb, D.; Wiens, P. 1997. “Protocols for measuring biodiversity: Benthic macroinvertebrates in fresh waters”, Department of fisheries and oceans and Freshwater Institute, Winnipeg, Canada.
9. Zimmerman, M. C. 1993. “The use of the biotic index as an indication of water quality”, *Proceedings of the 5th Workshop/Conference of the Association for Biology Laboratory Education (ABLE)*.
10. Roldán, G. 2003. “Bioindicación de la calidad de agua en Colombia, uso del método BMWP/Col”, Editorial Universidad de Antioquia, Colombia.
11. Jacobsen, D. 1998. “The effect of organic pollution on the macroinvertebrate fauna of Ecuadorian highland streams”. *Archiv für Hydrobiologie*, 158: 145-167.
12. Jacobsen, D.; Schultz, R.; Encalada A. 1997. “Structure and diversity of stream invertebrate assemblages: the influence of temperature with altitude and latitude”, *Freshwater Biology*, 38: 247-261.
13. Ríos, B.; Prat, N. 2004. “Estudios de las condiciones de referencia de las cuencas del río Pita, San Pedro y Machángara”, Departamento de Ecología, Universitat de Barcelona, España.

14. Domínguez-Granda, L.; Goethals, P. ; De Pauw, N. 2005. "Aspectos del ambiente físico-químico del río Chaguana: un primer paso en el uso de los macroinvertebrados bentónicos en la evaluación de su calidad de agua", *Revista Tecnológica ESPOL*, 18: 127-134.
15. Robayo, J.; Robayo G.; Zak, V. 2004. "Plan de manejo del Bosque Protector Río Guajalito". Quito, Ecuador.
16. Armitage, P.; Moss, D.; Wright, J.F.; Furse, M. T. 1983. "The performance of a new biological water quality score system based on macroinvertebrates over a wide range of unpolluted running-waters sites", *Wat. Res.* 17, 333-347.
17. Klemm, D.; Lewis P.; Filk, F.; Lazorchak J. 1990. "Macroinvertebrate field and laboratory methods for evaluating the biological integrity of surface waters", *Environmental monitoring systems laboratory*. Cincinnati, Ohio.
18. Jacobsen, D. 1998. "Human activities and stream environments in tropical regions" en: *Environment, health and sustainable development*, A. Reenberg y E. Moller Pedersen, SEREIN, Copenhagen, Dinamarca., pp. 121-127.
19. Carrera, C. ;Fierro K. 2001. "Manual de monitoreo: Los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad de agua". Ecociencia, Quito.
20. Arroyo, C. 2007. "Evaluación de la calidad de agua de las fuentes hidrográficas del Bosque Protector Río Guajalito (BPRG) a través de la utilización de macroinvertebrados acuáticos, Pichincha, Ecuador", Universidad San Francisco de Quito, Ecuador.

DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN DE SERVICIOS BASADOS EN LOCALIZACIÓN PARA REDES CELULARES DE TIPO *GLOBAL SYSTEM FOR MOBILE (GSM)* Y *UNIVERSAL MOBILE TELECOMMUNICATIONS SYSTEM (UMTS)* USANDO EL EMULADOR *MOBILE POSITIONING SYSTEM 6.0.1* PROVISTO POR LA EMPRESA ERICSSON.

Paúl A. Prócel M. Luis M. Prócel M. René Játiva * Julio Arauz

Colegio de Ciencias e Ingeniería, USFQ.

Resumen

En el presente artículo se describe el trabajo de programación de una aplicación para un servicio basado en localización (LBS: *Location Based Service*) usando el emulador MPS 6.0 proveído por la empresa Ericsson, el cual corre bajo redes GSM y UMTS. La aplicación consiste en que un usuario con una estación móvil envía un mensaje de texto corto (SMS) solicitando la dirección de un servicio específico a la aplicación LBS. Esta aplicación localiza a la Estación Móvil (MS: *Mobile Station*) y consulta en una base de datos la dirección de los locales que ofrecen el servicio solicitado que se encuentren cerca del cliente. Para emular el servicio, se programaron dos servlets, el primero emula la MS y el segundo es la aplicación LBS. El lenguaje utilizado en este software es JAVA. Además se realizan algunos análisis estadísticos del error de posición como es el cálculo del intervalo de confianza de la media del mismo y un análisis factorial.

Palabras Clave. Mobile Station (MS) Location Based Services (LBS). Global System for Mobile Communications (GSM). UMTS (Universal Mobile Telecommunications System).

Introducción

En 1999, la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) en Estados Unidos elaboró normas para el sistema inalámbrico de emergencia 911 [1]. En este sistema de emergencia, las líneas de comunicación 911 están destinadas únicamente para atender reportes de crímenes en progreso, incendio o requerimiento de ambulancias y primeros auxilios. Los objetivos de estas normas son mejorar la confiabilidad de las llamadas al 911 por celular, y proporcionar al personal de respuesta de emergencia y seguridad pública la información necesaria para que éstos puedan localizar y ayudar a los usuarios de teléfonos móviles de manera más efectiva. El gobierno de Estados Unidos, a través de la FCC, impuso un plazo a las compañías de telefonía móvil para que cumplan con el servicio de localización [2], dando apertura a la aplicación de servicios basados en localización (LBS).

En telefonía móvil actualmente existen tres tecnologías dominantes en el mundo: Interim Standard 136 (IS-136), Interim Standard 95 (IS-95) y GSM [3]. El IS-136 es un sistema de Acceso Múltiple por División en el Tiempo (TDMA: *Time Division Multiple Access* TDMA), que permite el acceso simultáneo a un canal por parte de varios usuarios organizados en distintas ranuras de tiempo. TDMA es la tecnología digital pionera en tecnología creada a partir de AMPS.

El IS-95 por su parte es un sistema de acceso múltiple por División en Código (CDMA: *Code Division Multiple Access*), en el cual múltiples usuarios acceden

a un canal, compartiendo la frecuencia, pero con códigos diferentes. Por las características de diseño puede resultar más eficiente en ciertos aspectos y permitir un mejor uso del espectro. El uso de esta tecnología predomina en Norteamérica [2].

La tecnología GSM se basa en la conmutación de circuitos de alta velocidad para la transmisión de voz y datos combinando ranuras de tiempo para cada canal, cuyo funcionamiento específico se explicará en el siguiente capítulo. GSM fue desarrollado en Europa y es la tecnología con mayor número de usuarios a nivel mundial.

En Ecuador el panorama de las comunicaciones móviles actualmente está dominado por GSM, aun cuando se está procediendo a una migración paulatina hacia UMTS. Aún más, la venta de la frecuencia e infraestructura de la operadora BellSouth a Telefónica aumentó el número de usuarios GSM, pues esta última compañía operadora, al ser de origen europeo, tiene preferencia por el uso de este tipo de red, por lo que actualmente ha abierto el soporte para esta tecnología, e inclusive está planificado migrar el sistema a GSM en su totalidad.

Es necesario mencionar que de acuerdo a la mayoría de redes GSM y UMTS a nivel mundial tienen infraestructura fabricada por la compañía Ericsson.

Aprovechando las oportunidades que ofrecen las aplicaciones de localización, se ha enfocado el trabajo en brindar servicios útiles para los clientes de telefonía

celular. De esta manera, el presente artículo explica el desarrollo de una aplicación basada en servicios de localización por medio de mensajes escritos utilizando herramientas que emulan una red celular GSM. Dicha aplicación, en un ambiente simulado, permite al usuario de telefonía móvil realizar consultas sobre la ubicación de servicios cercanos brindando información rápida y versátil.

Con el fin de determinar el error de la aplicación, se crearon dos escenarios virtuales: urbano y rural en dos tipos de red: GSM y UMTS.

Materiales y métodos

En el desarrollo del presente proyecto, se utilizaron conceptos definiciones y fundamentos técnicos de redes GSM, UMTS, y servicios SMS [6]. A continuación se explican las técnicas de posicionamiento en sistemas de telefonía móvil.

Técnicas de Posicionamiento

Los datos requeridos para el posicionamiento pueden ser obtenidos en la red (Network based) o en la estación base (Handset-based). Los sistemas basados en la red se fundamentan en realizar mediciones de la señal en varios puntos de la red, luego estos datos son enviados a un centro de procesamiento y finalmente se determina la posición de la estación móvil. Los sistemas que obtienen su posición en la estación móvil (determinan su propia posición), realizan mediciones de sensores geográficamente distribuidos para, luego de procesar su propia información y calcular su posición. El caso más común es GPS incorporado en una MS. [4]

Considerando este punto de vista, Younge [5], realizó la siguiente clasificación:

- Técnicas basadas en la red.
- Técnicas basadas en la Estación Móvil (MS: Mobile Station)

Técnicas basadas en la red

Ángulo de arribo (AOA).- Determina la posición del teléfono móvil mediante triangulación en 2 dimensiones, pues se tiene, en por lo menos dos estaciones base, el ángulo de arribo de la señal del teléfono móvil, y es posible realizar la intersección para determinar la posición como es ilustrado en la Figura 1 a). Requiere la instalación de antenas especiales en las estaciones base.

Tiempo de Arribo (TOA).- Determina la posición de la MS a partir de la intersección de círculos de distancia con centro en las BS como se puede ver en la Figura 2.7. b). Los radios son las distancias calculadas a partir del tiempo de arribo en la propagación de la señal.. Se requiere que las estaciones base se encuentren en perfecta sincronía de tiempo.

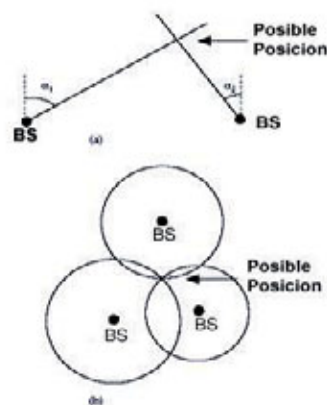


Figura 1. Métodos de determinación de posición: a) Ángulo de Arribo; b) Tiempo de Arribo. [7]

Parámetro de Avance de Tiempo (Timing Advance – TA).- El parámetro TA es una estimación de la distancia (en incrementos de 550 m) desde la estación móvil a la estación base. La medición está basada en el retardo de acceso entre el inicio de una ranura de tiempo en la estación base y la llegada de ráfagas desde la estación móvil para la misma ranura. El retardo de acceso es proporcional a la distancia entre la estación base y la estación móvil. En otras palabras, el TA corresponde a la diferencia de tiempo que hay entre la ranura de tiempo reservada en la estación base y cada vez que es recibida una señal que la estación móvil transmite para dicha ranura de tiempo como está ilustrado en la figura 2.

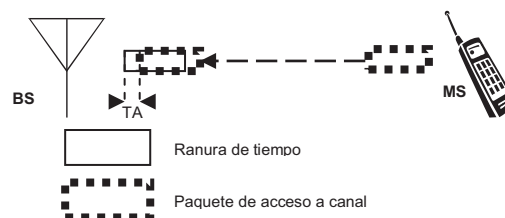


Figura 2. Parámetro de Avance de tiempo.

Técnicas de Radio Propagación.- Determina la posición de la MS a partir del nivel de potencia de la señal recibida a partir de un mapa de las características de propagación de RF de la celda, previamente realizado.

Tecnologías de Posicionamiento en SS7-Red Móvil.- Utiliza las actualizaciones de posicionamiento de la red celular. De este modo, el SS7 contiene la identificación de la celda de origen (COO) o cell ID donde se encuentra la MS. Luego, si la red es GSM utiliza el Código de Identificación del Estación Base (BSID) o el MAP; y, si es CDMA se basa en la señal estimada de calidad (SQE, ANSI-41) que designa la MS a la BS o un Requerimiento de posición (PosReq). La aplicación LBS puede encontrarse en la mitad de este proceso,

generando mensajes de requerimiento de posición hacia el HLR. El HLR puede responder con la información aproximada como COO o con información más precisa como es el Tiempo de arribo (TA, time of arrival) o el MAP para GSM.

Técnicas Basadas en la Estación Móvil

Diferencia Observada de Tiempo (E-OTD, Enhanced Observed Time Difference).- Estima la propia posición a partir del tiempo de ida y arribo (RTT, Round Trip Time) obtenidos a partir del TOA de tres o más estaciones base (BS). En este método la MS mide el tiempo de una señal en recorrer dos veces la distancia a tres o más BS, de este modo realiza el cálculo de la distancia aproximada y puede establecer su propia posición aproximada.

Período vacío de recepción OTD de arribo (IPDL-OTDOA, Idle Period Downlink OTD Of Arrival).- Consiste en una triangulación a partir del tiempo desde o hacia tres o más BS, en un área dentro del UTRAN (en UMTS). En el esquema de diversidad ortogonal de transmisión (OTD), existe un tiempo de diferencia entre la transmisión y la recepción, este es el tiempo a partir del cual se calcula la distancia a la UTRAN.

Sistema de Posicionamiento Global (GPS).- Consiste en modificar la MS agregando un GPS que se interconecta con señales de sincronía con tres o más satélites, de este modo la MS establece su posición, realizando cálculos a partir del tiempo.

intervención de la BS a fin de mejorar la precisión de la posición dada por el GPS. Este método es el más preciso de todos, como se muestra en la tabla 1.1.

En la tabla 1 se puede apreciar la precisión esperada para los métodos descritos anteriormente. Se puede llegar a concluir que los métodos basados en la red tienen poca precisión comparados con los métodos basados en la estación móvil. Cabe mencionar que el sistema de posicionamiento que emulamos en nuestro proyecto es Timing Advance combinada con la ubicación del Cell ID.

Nuestra propuesta consiste en realizar una aplicación LBS basada en SMS utilizando programas de emulación y escenarios virtuales. Es decir, se consideró la infraestructura genérica de aplicaciones basadas en SMS para integrar una aplicación LBS basada en Tecnologías de Posicionamiento en SS7- Red Móvil, básicamente, aunque la aplicación podría basarse en cualquier método de posicionamiento basado en la red.

Arquitectura de la aplicación LBS

La estructura general del servicio que estamos implementando consiste en un requerimiento de mensaje de texto, como se explica a continuación:

- Envío de un mensaje de texto a un número corto, con una sola palabra que describa el servicio deseado por el cliente.
- El mensaje y el número de la MS que realizó la petición es entregado a la aplicación LBS.
- La aplicación LBS ubica la MS y consulta en una base de datos las direcciones de los locales

Tecnología de Posicionamiento	Precisión	Red	Requerimientos de FCC
IN/SS7 Cell ID	200m-10km	GSM/CDMA	Basadas en la Red 100 metros 67% de veces, 300 metros 95% de veces
AOA	100m-2km	GSM/CDMA	
TOA,TA	500 m	GSM/CDMA	
EFLT / U-TDOA	250 – 350m	GSM/CDMA	
TOA, RTT	100-200m	GSM/CDMA	Basados en la MS 50 metros 67% de veces, 150 metros 95% de veces
E-OTD, AFLT	50-200m	GSM	
GPS	60s, 10-30m	GSM/CDMA	
A-GPS	1s, 1-10m	CDMA	
A-GPS/AFLT		CDMA	

Tabla 1. Precisión de posicionamiento por método usado. (Mark L. Younge P.E. ATIS GSC Delegation)

GPS Asistido (GPS-A).- Se utilizan dispositivos adicionales de la red de telefonía móvil junto con datos obtenidos de los satélites de GPS para determinar la posición de la MS. En este método, existe la

Debido a que la red del emulador no incluye el sistema de SMS, los elementos de red de este servicio debieron ser implementados en la programación de la aplicación.

del servicio deseado más cercanos a la MS.

- La aplicación LBS entrega las direcciones de los locales y sus nombres a la MS por medio de un SMS.

La figura 3 muestra la arquitectura de la aplicación, en la cual se observa que la aplicación está compuesta por dos computadoras y un conmutador.

Resultados y discusión



Figura 3. Arquitectura de la Aplicación LBS

En la computadora 1 se encuentra almacenado la aplicación que contiene la interfaz gráfica de la estación móvil y que realiza la función de puerta de enlace del servidor SMS. En el segundo ordenador se encuentran la aplicación del emulador, la aplicación LBS y la base de datos. El punto de mayor probabilidad de encontrar a la MS en el sector entregado por el emulador, es el centro geométrico del mismo. Luego de obtener las coordenadas del centro geométrico, la aplicación LBS realiza una consulta a la base de datos.

El sistema realiza los siguientes pasos:

1. De la computadora 1 (MS) se envía un mensaje al número corto 4040, solicitando el nombre y la dirección de un servicio determinado. Este mensaje es enviado por medio de una conexión SSL.
2. La computadora 2 (LBS) recibe el mensaje, y calcula la posición de la MS usando el emulador MPS-SDK 6.0.1.
3. La aplicación LBS calcula el centro geométrico del sector entregado por el emulador.
4. Con los datos del centro geométrico y el tipo de servicio solicitado, se realiza una consulta a la base de datos, la cual entrega el nombre y la dirección del servicio más cercano a las coordenadas del centro geométrico.
5. En la interfaz gráfica de la aplicación LBS se publica una imagen satelital de la región de búsqueda donde se resalta el posible sector donde se encuentra la MS,
6. Esta información es entregada a la MS (computadora 1).

Escenario	Red	Intervalo de confianza para la media del error
Urbano	GSM	269.73 ±11.71m
Rural	GSM	302.36±38.75m
Urbano	UMTS	1088.06±15.10m
Rural	UMTS	925.88 ±53.24m

Tabla 2. Resumen de los intervalos de confianza del error de posición en los distintos escenarios y tipos de red

Para el cálculo del error de posición, la aplicación se ejecutó en dos escenarios virtuales: urbano y rural creados en base a la aplicación GoogleEarth. Algunos factores influenciaron en la selección de estos escenarios como es la densidad de las de las estaciones base, siendo esta mayor en el escenario urbano. Cada uno de estos escenarios es emulado en una red GSM y en una UMTS.

Para el análisis factorial de los efectos se planteó lo siguiente [8]:

A: Tipo de red

B: Escenario

Donde las hipótesis son:

H0: Efecto A = 0

HA: Efecto A ≠ 0

H0: Efecto B = 0

HA: Efecto B ≠ 0

H0: Efecto AB = 0

HA: Efecto AB ≠ 0

El resultado obtenido se puede visualizar en la Tabla 3.

Como el valor F0 para cada efecto es mayor que el valor de la distribución F con $\alpha = 0.05$ y con los respectivos grados de libertad (1,288) se rechaza H0 para los tres efectos. Esto significa que los tres efectos son estadísticamente significativos en la respuesta de la variable de interés. Igualmente, en este análisis mientras más grande es el valor de F0, más significativa es su influencia en la variable de respuesta. En nuestro análisis en particular, se tiene que el efecto más significativo es el tipo de red seguido por el efecto combinado de ambos factores (tipo de red y tipo de escenario), por último el efecto menos significativo es el tipo de escenario.

El error de posición medido para redes UMTS es mayor que para redes GSM, debiendo considerar además que la media del error obtenido para redes UMTS para ambos escenarios es alrededor de 1km, lo cual es inaceptable para este tipo de red, ya que en la práctica el error de posición para redes UMTS es menor que para redes GSM. Se puede plantear la hipótesis de que el método para posicionamiento en redes UMTS no está depurado en el emulador. Sin embargo, no existe la documentación detallada para explorar más el tema.

La media y la varianza del error en los escenarios rurales son mayores que en escenarios urbanos en redes GSM, lo cual está explicado por la densidad de estaciones base, que es mayor para escenarios urbanos que en rurales, en otras palabras, la distancia entre estaciones base es mayor para escenarios rurales. Los datos de posicionamiento proporcionados por el emulador son aceptables para redes GSM, por lo que se recomienda el uso del emulador para este tipo de redes.

En redes UMTS la media del error es mayor para escenarios urbanos que para rurales, esto muestra

FV	SC	GL	CM	F ₀	F _{0.05,1,288}	
A	36603826.45	1	36603826.45	1295.64588	<3.94	rechazo H ₀
B	196944.40	1	196944.40	6.9711347	<3.94	rechazo H ₀
AB	522149.50	1	522149.50	18.4822439	<3.94	rechazo H ₀
error	8136406.82	288	28251.41			
Total	45459327.17	291				

Tabla 3. Tabla ANOVA para el diseño factorial de nuestro experimento

nuevamente un posible error en el emulador ya que por la densidad de estaciones base debería ser todo lo contrario. Por los errores mencionados en el emulador en redes UMTS, es recomendable no utilizarlo en aplicaciones basadas en este tipo de redes.

El efecto con mayor influencia en el error es el tipo de red, lo cual es coherente si consideramos que la media del error para escenarios UMTS es aproximadamente de 1km y para redes GSM es alrededor de 250m. Sin embargo, es importante recordar que el emulador tiene errores grandes para redes UMTS. El segundo efecto que influye es el efecto combinado de los factores: tipo de red y tipo de escenario. Por último, el efecto que menos influye, aunque es estadísticamente significativo es el tipo de escenario. El orden significativo de los efectos se debe al error del emulador para redes UMTS antes mencionado.

El emulador no cumple las tolerancias especificadas en la ordenanza E911, las cuales son de 100m para el estimado de la posición en el 67% de las llamadas y 300m para el 95%. Esto se debe a que el método de posicionamiento usado es CGI+TA y este método tiene una resolución aproximada de 550m y varía de acuerdo al radio de la celda.

Agradecimientos

A Julio Arauz por la guía y ser el mentalizador del presente proyecto. A nuestros profesores: Bruce Hoeneisen, Javier Dávila, Diego Benítez, Nelson Herrera, Santiago Navarro, Carlos Marín, Fausto Pasmay y en especial a René Játiva por su excepcional y valiosa ayuda en el desarrollo de este trabajo.

Referencias bibliográficas

1. Federal Communications Commission; 2008 "911 Services".
2. Charny, B. 2003 July 1 "GSM gaining ground in North America". CNET News.com.,
3. Martínez, E. 2001. "Evolución de la tecnología celular". Revista NET News.com.

4. Drane, C.; Macnaughtan, M.; Scott, C. 1998. "Positioning GSM Telephones". IEEE Communications Magazine, pp 47
5. Younge, M "Identification and Location Services (ILS)", L. P.E. ATIS GSC Delegation GSC-9. Seoul.
6. Smith, C.; Collins D. 2002. *3G wireless networks*. McGraw Hill.
7. Zhao, Y. 2002 "Positioning for 3G Systems". IEEE Communications Magazine, 40: 108-116.
8. Devore, J. 1998. *Probabilidad y estadística para ciencias e ingeniería*. México D.F. Editorial Thompson.

SEGUIMIENTO DE DISPOSITIVOS MÓVILES EN UN SISTEMA DE COMUNICACIONES MÓVILES CELULARES

Santiago Silva René Játiva *

Colegio de Ciencias e Ingeniería, USFQ.

Resumen

Este artículo trata sobre el uso de algoritmos estadísticos en la estimación de señales de una red celular y su aplicación al posicionamiento y seguimiento de dispositivos móvil, con la finalidad de conseguir que la red esté en capacidad de proporcionar servicios basados en localización que podrían ser explotados conforme a las necesidades de los usuarios del sistema.

Se introducen brevemente dos técnicas de posicionamiento homogéneas: la primera basada en la estimación de los instantes de llegada de la señal (TOA), y la otra en la observación de la diferencia de instantes de llegada (TDOA); y se utilizan ciertos estadísticos desarrollados para estimar la varianza del error de posicionamiento al aplicar estas metodologías, para simular un entorno realista en el cual se disponen de mediciones de posición de suscriptores móviles. Estas mediciones contienen errores asociados a las limitaciones inherentes de la aplicación de estas metodologías sobre canales móviles, en este caso especialmente a sesgos introducidos por la presencia de propagación multitrayecto. A partir de estas medidas y de las ecuaciones de estado que definen el movimiento del dispositivo, y mediante la aplicación del Filtro de Kalman, se refina la estimación de posición. En efecto, el Filtro de Kalman minimiza el ruido de medida, a partir de su estadística y del comportamiento de los datos; es un filtro adaptativo cuyo uso permite conseguir una mejor aproximación de los resultados, y por consiguiente una mayor flexibilidad en los servicios basados en localización (LBS) que potencialmente podrían derivarse de su incorporación al esquema de localización.

El esquema desarrollado en esta propuesta se ha integrado para su visualización en un programa de mapas en tiempo real, GoogleEarth, que ocupa el puesto de servidor geográfico en este proyecto. En este artículo, se realiza la evaluación de las dos técnicas de posicionamiento ya mencionadas: TOA y TDOA, y del seguimiento de suscriptor móvil a través del uso del filtro de Kalman, en operación integrada, y no incluye los procesos de gestión y cálculo requeridos en una red celular para llevar a cabo la localización.

Palabras Clave. Kalman, Time Of Arrival (TOA), Time Differences Of Arrival (TDOA), Location Based Services (LBS).

Introducción

La determinación de la posición de un terminal móvil surgió ante la necesidad de ofrecer servicios de emergencia, y gestión de flotas, y sin duda supuso un impulso muy importante el mandato de 1999 de la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) de los Estados Unidos, de que para Octubre de 2001, los servicios de emergencia deberían ser capaces de posicionar automáticamente a cualquier ciudadano que llamase al 911, dentro de 125m en dos tercios de los casos. A partir de entonces los servicios basados en localización (LBS) han tenido un desarrollo importante, de forma que estudios recientes de STRATEGY-ANALITICS predicen que los gastos que el usuario final en América del Norte realizará por concepto de esta clase de servicios crecerá desde 110 millones de dólares a finales de 2006 hasta alrededor de 2.200 millones de dólares a finales de 2011, y que alrededor de la tercera parte de esta contribución se producirá en el servicio de navegación de automóviles. La determinación de la posición de un terminal móvil no sólo es de utilidad para la prestación de LBS, sino también es de utilidad en la gestión de recursos radio y puede

aplicarse para maximizar la capacidad de un sistema de comunicaciones móviles.

El posicionamiento del suscriptor móvil puede realizarse de dos maneras: utilizando esquemas basados en red, que utilizan la infraestructura de la red celular existente; o esquemas basados en el terminal, que incorporan un dispositivo GPS (*Global Positioning System*) que se encarga de proveer la localización. Este último esquema se está desarrollando ampliamente en la actualidad. Estos esquemas se ilustran en la Figura 1.

Cualquiera de estos esquemas tiene sus propias limitaciones; así por ejemplo el esquema basado en GPS necesita un mínimo de tres satélites para determinar la localización del terminal móvil y su exactitud puede ser disminuida por la presencia de vegetación pesada, y geografía irregular (montañas o edificios altos). Los esquemas basados en red por su parte, se ven degradados en formas diversas que dependen del conjunto de señales utilizadas para efectuar la localización, tales como variaciones de potencia en la señal recibida, errores de sincronismo en las estaciones base (BS), sesgos originados en la propagación multitrayecto y en la presencia de obstrucciones, etc. Estas técnicas requieren también de la interacción de la

unidad móvil con varias estaciones base para conseguir mejorar su resolución, lo cual se dificulta en áreas rurales y de poca densidad de población. [1][2].

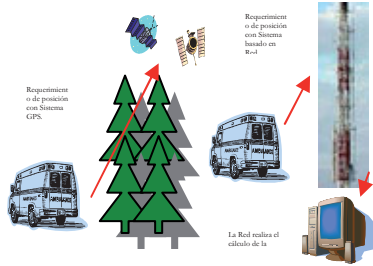


Figura 1. Ilustración de la determinación mediante la Técnica del TOA.

Para determinar la posición del suscriptor, un esquema basado en red puede hacer uso de la estimación de parámetros de la señal tales como: la potencia de la señal recibida, el tiempo de llegada de las señales (TOA: *Time Of Arrival*), la diferencia de los tiempos de llegada observados (TDOA: *Time Difference Of Arrival*), el ángulo de llegada (AOA: *Angle of Arrival*) de las mismas, entre otras. Las técnicas de estimación de la posición basadas en la estimación de los instantes de llegada o de sus diferencias se encuentran en el núcleo de los esquemas de alta resolución y por tanto su uso se contempla dentro de este trabajo.

La posición puede estimarse a partir de la estimación de los parámetros de TOA y TDOA usando la solución de Torrieri que asume que el error, e , en las estimaciones de los instantes de llegada de la señal se distribuye como ruido blanco y Gaussiano de media nula y matriz de covarianza, N_e [2]; y a partir de este conocimiento y del conjunto de parámetros de la técnica empleada es factible la aplicación de un algoritmo iterativo que converge hacia la posición más probable. Es factible también a partir de la estadística de estos parámetros, estimar la varianza del error de posicionamiento para una técnica particular, y por tanto realizar simulaciones que modelen este fenómeno y que permitan evaluar estas técnicas basadas en red.

A partir de la obtención de las estimaciones de posición, y siguiendo con el objetivo de este trabajo se introduce el Filtro de Kalman para conseguir el seguimiento del dispositivo móvil, lo cual involucra el disponer de una aproximación más exacta y dotar de mayor confianza al sistema. En efecto, el Filtro de Kalman es una herramienta que es capaz de modelar la evolución de señales en tiempo real, para lo cual usa ecuaciones de movimiento y mediciones de posición en forma iterativa.

Materiales y métodos

Obtención de la posición geográfica de la ruta y de las estaciones base

Para la simulación del entorno de trabajo se utiliza la herramienta Maptool que es el encargado de generar los archivos de ruta con las posiciones geográficas y forma

parte del simulador MPS-SDK 6.0 para el desarrollo de aplicaciones LBS sobre una red GSM o UMTS de la empresa Ericsson, que nos permite dibujar las trayectorias de los dispositivos móviles en la red y obtener sus coordenadas en un archivo de texto. Las posiciones reales se extraen y una vez infectadas con ruido de medida posibilitan realizar los análisis respectivos. Además, en otro archivo de texto se encuentran las localizaciones geográficas de las BS, las cuales son imprescindibles en el proceso de localización.

Localización mediante la técnica del TOA

En la técnica de localización conocida como TOA, el objetivo es conocer la distancia entre el móvil (MS: Mobile Station) y la estación base (BS: Base Station), para ello se miden los tiempo de propagación de la señal que toma en llegar desde la MS a cada una de las BS y se las relaciona con las distancias entre transmisor y receptor a través de la velocidad de la luz [2][3]. Esto permite obtener un conjunto de ecuaciones a partir del cual se estima la posición del móvil dentro de la red celular [3].

Es fácil entender entonces que el tiempo de propagación de la señal, t_i , desde el transmisor hasta una estación base BS_i se relaciona con la distancia, d_i , como se indica en la siguiente expresión:

$$t_i = \frac{d_i}{c} + e_i \quad (1)$$

Y que este conjunto de ecuaciones expresado en notación vectorial toma la siguiente forma, donde $\mathbf{f}(\mathbf{r})$ relaciona la distancia con las coordenadas del suscriptor móvil y de cada una de las estaciones base:

$$\mathbf{t} = \mathbf{d} / c + \mathbf{e} = \mathbf{f}(\mathbf{r}) + \mathbf{e} \quad (2)$$

Note que el lugar geométrico de la posición para cada una de estas ecuaciones da lugar a una circunferencia centrada en una BS tal como se muestra en la Figura 2, y la estimación en base a la solución de Torrieri en puntos de color negro.

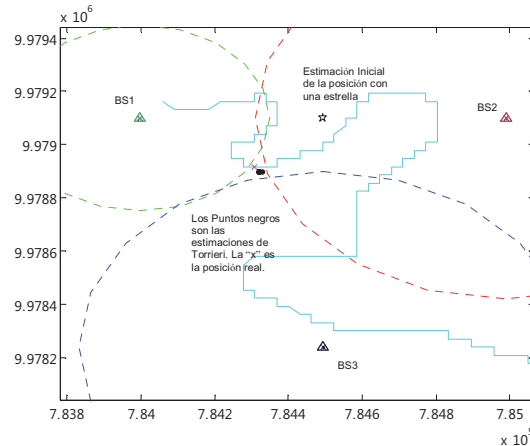


Figura 2. Visualización de la técnica del ToA con la solución de Torrieri

La dificultad en la solución del sistema expresado por la ecuación (2) radica en que $\mathbf{f}(\mathbf{r})$ no es una función lineal,

que $\mathbf{e}$ se desconoce y tiene una característica estocástica [3]. Para la técnica del ToA la solución de Don J. Torrieri es ahora clásica, y se basa en asumir que el vector de error $\mathbf{e}$ se distribuye como ruido blanco y Gaussiano de media nula y matriz de covarianza $\mathbf{N}_e$ [2][3]. De esta forma, la probabilidad de estimar $\mathbf{t}$ dado que el móvil se encuentra en la posición $\mathbf{r}$, se expresa como en la ecuación (3), siendo N el número de ecuaciones de rango (número de estaciones base) disponibles [2].

$$p(\mathbf{t} | \mathbf{r}) = \frac{1}{(2\pi)^{N/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}[\mathbf{t} - f(\mathbf{r})]^T \mathbf{N}_e^{-1} [\mathbf{t} - f(\mathbf{r})]\right\} \quad (3)$$

La solución de Torrieri en (4) se calcula buscando el valor de $\mathbf{r}$ que minimiza la probabilidad de cometer un error en la estimación de $\mathbf{t}$, aplicando la relación de máxima verosimilitud para inmediatamente linealizar la solución a través de una expansión de Taylor alrededor de un punto cercano a la posición del suscriptor, $\mathbf{r}_0$, y que puede conseguirse fácilmente puesto que la celda donde éste se encuentra se encuentra siempre disponible.

$$\hat{\mathbf{r}}_{TOA} = \mathbf{r}_0 + c(\mathbf{F}^T \mathbf{N}_e^{-1} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{N}_e^{-1} (\mathbf{t} - \mathbf{d}_0 / c) \quad (4)$$

La matriz $\mathbf{F}$ en la expresión anterior hace alusión a la geometría del problema de localización y que para esta técnica toma la forma en la ecuación (5).

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} (\mathbf{r}_0 - \mathbf{s}_1)^T / d_{01} \\ \vdots \\ (\mathbf{r}_0 - \mathbf{s}_N)^T / d_{0N} \end{bmatrix} \quad d_{0i} = \|\mathbf{r}_0 - \mathbf{s}_i\| \quad (5)$$

Donde $\mathbf{s}_i$ corresponde a la posición de la BS_{*i*}.

Localización mediante la técnica del TDOA

En un esquema de localización basado en la observación de la diferencia de instantes de llegada hacia dos BS el lugar geométrico de la posición para cada ecuación define una hipérbola en lugar de la circunferencia del caso anterior [3]. En este caso la ecuación la forma siguiente:

$$t_i - t_{i+1} = (d_i - d_{i+1}) / c + n_i \quad (6)$$

Donde n_i corresponde al error de medida tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$n_i = e_i - e_{i+1} \quad (7)$$

En forma vectorial, este conjunto de ecuaciones se escribe como sigue:

$$\mathbf{Ht} = \mathbf{Hd} / c + \mathbf{n} \quad (8)$$

Donde la matriz $\mathbf{H}$ define la geometría del problema para esta técnica.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Como se describe en [2], la solución de Torrieri para la técnica del TDoA es análoga a la presentada para la técnica del ToA, y toma la forma de la ecuación (10).

$$\hat{\mathbf{r}}_{TDOA} = \mathbf{r}_0 + c(\mathbf{F}^T \mathbf{H}^T \mathbf{N}^{-1} \mathbf{H} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{H}^T \mathbf{N}^{-1} (\mathbf{Ht} - \mathbf{Hd}_0 / c) \quad (10)$$

Donde la matriz de covarianza del error de medición $\mathbf{N}$, se define como:

$$\mathbf{N} = (\mathbf{H} \mathbf{N}_e \mathbf{H}^T) \quad (11)$$

Se muestra en las expresiones (10) y (11) que la estimación de la posición está relacionada con la matriz de covarianza del error de las medidas, $\mathbf{N}_e$, y con la geometría del problema a través de las matrices $\mathbf{F}$ y $\mathbf{H}$ según la técnica empleada. Para la realización de las simulaciones se ha utilizado en lugar de las covarianzas del error de las medidas, sus cotas inferiores de Cramer-Rao, por lo cual se asume un entorno optimista.

Filtrado de Kalman

En este trabajo se utiliza el Filtro de Kalman vectorial [4][5] a efectos de conseguir el seguimiento en el tiempo del suscriptor móvil.

Dadas las Observaciones = $\{y_{(1)}, y_{(2)}, \dots, y_{(n)}\}$, se tiene un sistema de medición, donde deben conocerse parámetros respecto del funcionamiento del filtro, entre estas la Matriz de transición, que hace referencia a las ecuaciones cinemáticas de movimiento del problema.

$$F_{(n+1,n)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & dt & 0 \\ 0 & 1 & 0 & dt \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz de medición, $\mathbf{C}$, donde se combinan los resultados de las mediciones.

$$\mathbf{C}_{(n)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

La matriz de correlación de la varianza del proceso, $\mathbf{Q}_{1(n)}$, donde se determinan los estadísticos del proceso en sí mismo.

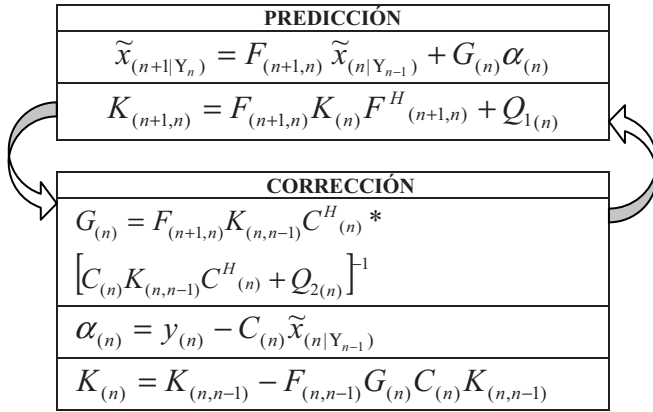
La matriz de correlación de la varianza del ruido de medición, $\mathbf{Q}_{2(n)}$, donde se determinan los estadísticos del ruido, y que para el caso de TOA y TDOA se obtienen directamente de la técnica.

Las condiciones iniciales permiten empezar el ciclo de predicción de Kalman

$$\tilde{x}_{(1|Y_0)} = E[x_{(1)}]$$

$$K_{(1,0)} = E[(x_{(1)} - E[x_{(1)}])(x_{(1)} - E[x_{(1)}])^H] = \Pi_0$$

A continuación se presentan las ecuaciones de predicción y corrección



Finalmente, utilizando este conjunto de ecuaciones, el filtro de Kalman puede determinar y estimar la posición en base a los datos y estadísticos que se le proporciona.

Resultados y discusión

El siguiente experimento se ha desarrollado para observar el funcionamiento de las técnicas estudiadas y la aplicación del filtro de Kalman.

Los objetivos de este experimento son los siguientes:

- Estudiar el funcionamiento del sistema de localización a velocidades inferiores a 10 km./h.
- Visualizar y estudiar el comportamiento del filtro en una ruta de carretera.

En esta experiencia, se analiza la técnica del TOA y del TDOA para el caso en el que se tienen 3 ó 4 BS cercanas, en capacidad de servir al dispositivo móvil. Esta presunción se la hace con un radio de cobertura de

parámetros del proceso tales como la varianza de las medidas en los dos ejes de coordenadas utilizados, y las varianzas de las velocidades. Las primeras pueden estimarse a partir de cotas tales como las de Cramer-Rao [2][5], para las técnicas empleadas; y las últimas se



asumen que toman valores muy pequeños, lo cual es una suposición razonable para móviles desplazándose a velocidad constante, o cuando la actualización de las medidas se realiza en un corto intervalo ($t \sim 1s$).

Figura 4. Visualización de la ruta real sobre una foto Satelital

Durante la realización de esta experiencia, las varianzas del proceso se mantuvieron constantes, debido a la dificultad en su adquisición, pero se destaca el hecho de que estos estadísticos deberían calcularse justo en el momento que ocurre la solicitud de localización, así como debería disponerse de un tiempo de espera para efectuar la inicialización de determinados parámetros del filtro, como la estimación de la velocidad por ejemplo.

La Tabla 1 muestra estadísticos respecto de la precisión en la posición estimada cuando se aplica el Filtro de Kalman en el proceso de refinamiento de la posición, cuando se han aplicado técnicas de TOA o TDOA en el núcleo de la función para el cálculo de la posición de la unidad móvil. Esta tabla muestra por ejemplo que la estimación de la posición presenta un sesgo de entre -1

Experimento	Desviación estándar		Varianza		Valor medio		Valor medio del error absoluto	
Coordenadas	x	y	x	y	x	y	x	y
ToA (3BS)	12.96	14.06	167.99	197.63	-0.91	0.25	16.56	17.91
ToA (4BS)	13.37	13.22	178.62	174.85	-0.57	-0.76	16.50	17.23
TDoA (3BS)	13.89	15.86	192.99	251.59	-0.90	1.57	17.93	20.57
TDoA (4BS)	12.51	16.90	156.48	285.66	-0.88	0.23	14.97	19.21

Tabla 1. Estadísticos del error después del filtrado de kalman.

200m y que corresponde a un entorno urbano. En la Figura 4 se puede observar la ruta seguida por el dispositivo móvil.

Para mostrar el comportamiento del filtro de Kalman en el seguimiento de un dispositivo móvil, se fijan los

y 2 m, que se reduce al aumentar el número de estaciones base; y que el error de posicionamiento se encuentra entre 15 y 20m. Estos resultados muestran una clara mejoría respecto de las mediciones originales cuyo error bordeaba los 40m.

En la Figura 5 pueden observarse los resultados para el seguimiento. La gráfica superior utiliza la técnica de TOA, y la inferior la de TDOA (ambas para 3 B.S.), mostrando ambos resultados muy prometedores para la implementación de este servicio, siendo mejor la aplicación de la técnica basada en TDOA con cuatro BS que la de TOA con tres, por lo cual la primera se prefiere sobre la segunda, dado que esta técnica permite trabajar cómodamente aun con sincronización global deficiente.

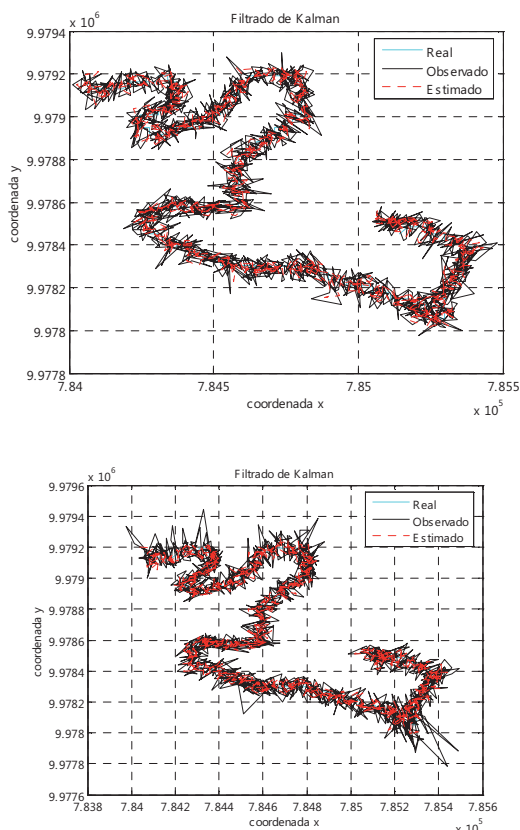


Figura 5. En la parte de arriba la técnica del ToA y en la parte inferior el TDoA para 3 estaciones base

Trabajos posteriores podrían desarrollarse en el sentido de implementar un simulador propio a fin de tener control sobre determinados parámetros que aparecen como inalterables en la herramienta, como el período de muestro por ejemplo.

Cabe señalar finalmente que este trabajo ha permitido tener herramientas y evidencias del comportamiento del filtro, y la enorme importancia de la inicialización de los parámetros de varianzas de la velocidad vectorial en el momento del cálculo de la posición, tópico éste que se encuentra en investigación y que será abordado en un artículo posterior.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Politécnica de Cataluña que ha permitido hacer uso de algunos de los resultados del proyecto SATURN para la realización de las simulaciones que se muestran en este documento.

Referencias bibliográficas

1. Olga Muñoz et al. 2000. "SATURN 231: Overview of UMTS User Location Possibilities and Limitations". Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Barcelona - España
2. Játiva R., Vidal J. 2004. "Principios y Evaluación del Servicio de Localización en UMTS". Centro de Investigación Científica (CEINCI).
3. Vidal J., Játiva R. 2000. "SATURN Report D621". Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Barcelona – España.
4. Perret G. "Kalman Tracking para peatones basado en TDOA para Sistemas Móviles Celulares". Instituto de Ingeniería Eléctrica Facultad de Ingeniería de la R.O.U.
5. G. Bishop. 2001. "An Introduction to the Kalman Filter". University of North Carolina at Chapel Hill. 2001.

UNA PROPUESTA DE CAMBIO SUSTANCIAL EN LA ENSEÑANZA DE LA MATEMÁTICA EN LA ESCUELA ELEMENTAL.

Valentina Aguilar.^{*1, 2}

1 Colegio de Ciencias e Ingeniería, USFQ.

2 Visiting Professor, Mathematics Department, Western Michigan University.

Resumen

La última década ha marcado un acelerado cambio en el uso de diferentes instrumentos de psicología cognitiva en la investigación en el área de educación en matemáticas. Este artículo sintetiza nuevas propuestas en la enseñanza de la matemática elemental basadas en teorías de psicología del aprendizaje que argumentan la presencia de estructuras cognitivas pre-existentes a la instrucción, las cuales posibilitan el pensamiento proporcional como un componente distinto del componente lógico en el que se basa el desarrollo del concepto de número cardinal en la instrucción elemental. Se expone además una posible línea de desarrollo de implementación de este cambio para la enseñanza del concepto de fracción conjuntamente con preguntas abiertas a futuras investigaciones.

Palabras Clave. Educación en matemáticas, número, fracción, proporción.

Desarrollo

La enseñanza de la matemática elemental dedica sus mayores esfuerzos -en términos de número de horas de instrucción, tipo de actividades, énfasis en la instrucción, etc. - al desarrollo del concepto de número cardinal. Para ello se parte del presupuesto de que el aprendizaje del concepto de número está basado en la capacidad pre-existente en el cerebro humano de captar la numerosidad de objetos discretos. Estudios de psicología cognitiva muestran que hay tres operaciones mentales pre-existentes a la instrucción: conservación por traslación, comparación por aumento y comparación por disminución. Experimentos realizados en infantes y niños de edad pre-escolar sin instrucción en numerosidad demuestran que estas tres operaciones son utilizadas para resolver problemas de comparación de cardinalidad entre conjuntos con objetos discretos (bolas, figuras geométricas, juguetes, etc.). Estos experimentos producen, entre otros, dos resultados que son relevantes por su discrepancia: a) El experimento donde una fila de objetos se traslada sin cambiar la distancia entre ellos; y b) El experimento donde el conjunto inicial de objetos se traslada cambiando la distancia entre tales objetos. Infantes y niños de edad pre-escolar 3-4 años muestran la capacidad de realizar juicios correctos de conservación de cardinalidad en el primer experimento, mientras que en el segundo caso realizan juicios errados [1]. La explicación de esta discrepancia hace referencia a la confusión entre un juicio sobre cardinalidad y un juicio sobre medida longitudinal de las filas de objetos. Una manera alternativa de comprender este experimento es la siguiente hipótesis: la capacidad de medida longitudinal es la que posibilita el desarrollo del concepto de cardinalidad. Dicho de otra manera: es posible desarrollar el concepto de número cardinal con base en juicios correctos de comparación de medidas longitudinales o de proporcionalidad. Las

actuales investigaciones sobre el tema implican un cambio profundo en la forma de instrucción de la matemática en la escuela elemental [2].

La propuesta tradicional parte de que para trabajar el concepto de fracción se requiere haber comprendido previamente la división de naturales. A su vez la división se sustenta en el aprendizaje previo de la multiplicación, vista como extensión de la suma que a su vez es posible solo cuando se ha dominado la suma y la resta. Respetando esta secuencia, el concepto de fracción se incluye en el currículo ecuatoriano desde el sexto año de básica (10-11 años de edad). De manera similar, en el currículo norteamericano se desarrolla de manera intensiva entre quinto y sexto grado (10-12 años), aunque aparece gradualmente desde segundo grado (7-8 años). El concepto de fracción se presenta utilizando la noción "parte-todo", basada en contar partes de un todo que ha sido dividido en partes iguales. La fracción expresa un número de partes escogidas de entre el total de las partes.

La nueva hipótesis sustenta la instrucción que haga uso y desarrollo intensivo de la capacidad de dimensionar cantidades mediante comparación. Esta propuesta implica trabajar paralelamente el pensamiento aditivo y el pensamiento multiplicativo, una diferencia sustancial respecto a la manera secuencial implementada en el currículo tradicional [2]. La diferencia entre una y otra aproximación puede ejemplificarse de la siguiente manera: el pensamiento aditivo modela el número 3 como la unión de una manzana + una manzana + una manzana. Por otro lado el pensamiento multiplicativo entiende el número natural como una comparación con la unidad de medida. Visto así, el pensamiento multiplicativo no requiere del aditivo. Entonces, 3 es la relación entre 3 manzanas a 1 manzana. Esto no solo involucra pensamiento multiplicativo sino razonamiento

proporcional [3]. La definición formal del conjunto de los números racionales implica que el conjunto de los naturales sean un subconjunto propio. La nueva propuesta de instrucción coincide con la definición formal: los números naturales son caso particular de las fracciones.

Podemos analizar otro ejemplo que contrasta el enfoque tradicional con la nueva propuesta. La división normalmente se comprende como la operación opuesta a la multiplicación. En la nueva perspectiva la división consiste en escoger apropiadamente una nueva unidad de comparación. Así, el problema de 15 caramelos repartidos para 5 niños, se resuelve comúnmente dividiendo 15 para 5 igual a 3, pues 5 por 3 es 15. También se puede resolver utilizando ‘repartición’: se reparten los caramelos hasta agotarlos. Desde la nueva perspectiva el proceso de dividir dos números naturales se convierte en escoger una nueva unidad de comparación: hay cinco paquetes de tres caramelos (la nueva unidad de medida es tres caramelos no un caramelo) por tanto $15 \text{ caramelos} / 5 \text{ personas} = 5 \text{ paquetes (de 3 caramelos) / 5 personas} = 1 \text{ paquete (3 caramelos) / 1 persona} = 3 \text{ caramelos/ persona}$. Lo que interesa aquí es que la proporción se mantiene entre caramelos y personas con la unidad original (caramelo) o con la nueva unidad (paquete de tres caramelos).

Conclusiones

La posibilidad de desarrollar aritmética desde la comparación de dimensiones no es nueva, toda la aritmética griega es un ejemplo; a pesar de ello, la nueva propuesta resulta radical pues conlleva profundos cambios en la propuesta curricular vigente.

Hacemos uso constante de relaciones de proporcionalidad para movernos y ubicarnos espacialmente, la psicología cognitiva esta proporcionando evidencias de que podemos hacer uso de las estructuras cognitivas del cerebro para comprender y enseñar de manera más natural conceptos complejos como el de fracción. La introducción de fracciones suele ser el contenido crucial donde la capacidad matemática de los niños y niñas se pone a prueba. A partir de este momento los estudiantes se sienten preparados o no, a gusto o en disgusto con la instrucción posterior. Pruebas internacionales muestran que el rendimiento en matemática disminuye a partir de los 10 años, en ciertos casos de manera drástica, como sucede en Ecuador, precisamente cuando el concepto de fracción entra en el currículo [5][6]. El marco conceptual de V. Baddeley es ahora firmemente utilizado en la investigación de los procesos cognitivos que el cerebro ejecuta en tareas de aprendizaje. En este modelo, la memoria de trabajo es un sistema de procesamiento central que tiene dos componentes separados: el fonológico y el visoespacial. Toda pieza de instrucción debe procurar el uso de ambos [4]. El modelo sustenta la introducción a lo largo de la escuela primaria de actividades con pensamiento proporcional, que hace uso de ambos

componentes. La posibilidad de implementación y el impacto en la instrucción de cada una de las actividades propuestas están abiertos a futuras investigaciones.

Entender los procesos de pensamiento lógico y su interacción con el pensamiento espacial es crucial para crear una instrucción que potencialice el uso de la matemática.

Referencias bibliográficas

1. Starky P, Cooper R., 1980, “Perception of numbers by human infants”, *Science*, 210, pp. 1033-1035.
2. Sophian C., 2007, “The Origins of Mathematical Knowledge in Childhood”, Lawrence Erlbaum Associates, Taylor and Francis group, New York, pp. 85-105.
3. Sophian C., 2000, “Perceptions of proportionality in young children”, *Cognition*, Volume 75, Issue 2, pp. 145-170.
4. Tronsky N. L. , Royer J., 2002, “Relationships among basic computational, automaticity, working memory and complex mathematical problema solving”, *Mathematical cognition*, ed. James M. Royer, Information Age Publisher, Greenwich, Connecticut, pp. 117-146.
5. Gonzales P, et al., 1999 “Pursuing Excellence: Comparisons of International Eighth-Grade Mathematics and Science Achievement From a U.S. Perspective: 1995 and 1999”, *Education Statistics Quarterly*, Vol 3, Issue 1.
6. PREAL, Contrato Social por la Educación, Grupo Faro, 2006, “Calidad con Equidad: El desafío de la educación Ecuatoriana. Informe de Progreso Educativo 2006”, Publicaciones Organización de Estados Iberoamericanos.

PROYECTIVIZACIÓN Y DIMENSIONES HOMOLÓGICAS

Juan Carlos Bustamante^{*1}

François Huard²

David Smith³

1 Colegio de Ciencias e Ingeniería, USFQ

2 Department of Mathematics Bishop's University,
Sherbrooke, Québec-Canada.

3 Department of Mathematics Bishop's University,
Sherbrooke, Québec-Canada.

Resumen

Estudiamos propiedades homológicas del álgebra de endomorfismos $\text{End}_\Lambda(P^\infty)^{op}$, donde Λ es un álgebra de artin de dimensión global infinita, y P^∞ es la suma directa de los representantes de la clases de isomorfismo de los Λ -módulos proyectivos indescomponibles tales que $P/\tau P$ tiene dimensión proyectiva infinita.

Palabras Clave. Dimensiones homológicas, dimensión finitística.

1 Introducción

Sea Λ un álgebra de artin y $\Lambda\text{-mod}$ la categoría de Λ -módulos izquierdos finitamente generados. Dado un Λ -módulo proyectivo ${}_P P$, denotemos por $P\text{-mod}$ la subcategoría plena de $\Lambda\text{-mod}$ formada por los Λ -módulos ${}_P M$ que admiten presentaciones de la forma

$$P_1 \longrightarrow P_0 \twoheadrightarrow M \longrightarrow 0$$

donde P_0, P_1 , son sumas de sumandos directos de P .

Sea $\Gamma = \text{End}_\Lambda(P)^{op}$, la opuesta del álgebra de endomorfismos de P . El teorema de proyectivización de Auslander (ver [2, I, (2.1), (2.5), y (Ejercicio 2)]) establece que las categorías $P\text{-mod}$ y $\Gamma\text{-mod}$ son equivalentes mediante los funtores $\text{Hom}_\Lambda(P, -)$ y $P \otimes_\Gamma -$:

$$\text{Hom}_\Lambda(P, -) : P\text{-mod} \xrightleftharpoons{\sim} \Gamma\text{-mod} : P \otimes_\Gamma -.$$

Sin embargo, en general no hay relación entre las dimensiones homológicas de las categorías $\Lambda\text{-mod}$ y $\Gamma\text{-mod}$.

En este trabajo consideramos el caso particular en que $P = P^\infty$ es la suma directa un representante de cada clase de isomorfismo de los Λ -módulos proyectivos indescomponibles P tales que el cociente de P por su radical es un módulo simple de dimensión proyectiva infinita. En particular mostramos que si M es un Λ -módulo tal que la dimensión proyectiva del Γ -módulo $\text{Hom}_\Lambda(P^\infty, M)$ es finita, entonces se tiene que la dimensión proyectiva de M también lo es. Como consecuencia, si es que Λ tiene dimensión global infinita, todos los Γ -módulos simples tienen dimensión proyectiva infinita.

El artículo está estructurado de la siguiente manera: en la sección 2, sección de preliminares, hacemos un breve recuento de notaciones, construcciones y resultados necesarios para los resultados principales, que serán expuestos en la sección 3, en donde además daremos algunos ejemplos.

2 Preliminares

Si bien recordamos algunas nociones y notaciones, referimos al lector a [1, 2], por ejemplo, para mayores detalles de álgebra homológica y teoría de representaciones de álgebras.

En todo este trabajo Λ designará un álgebra de artin, cuyo radical de Jacobson será τ . El radical de la categoría $\Lambda\text{-mod}$ es el ideal $\tau_\Lambda = \tau(\Lambda\text{-mod})$ de ésta última definido, para cada par X, Y de Λ -módulos, mediante $\tau_\Lambda(X, Y) = \{f \in \text{Hom}_\Lambda(X, Y) \mid hfg \text{ no es un isomorfismo para ningunos } g \in \text{Hom}_\Lambda(U, X), \text{ y } h \in \text{Hom}_\Lambda(Y, U)\}$.

Dado un Λ -módulo M , su dimensión proyectiva será denotada por $\text{dp}_\Lambda M$, y su top es $\text{top } M = M/\tau M$. Además, $\text{add } M$ denotará la subcategoría plena de $\Lambda\text{-mod}$ formada por los módulos que son sumas de sumandos directos de M .

La dimensión finitística de Λ es:

$$\text{fin dim } \Lambda = \sup\{\text{dp}_\Lambda X \mid X \in \Lambda\text{-mod}, \text{dp}_\Lambda X < \infty\},$$

y su dimensión global es

$$\text{dim gl } \Lambda = \sup\{\text{dp}_\Lambda X \mid X \in \Lambda\text{-mod}\}.$$

El siguiente resultado, bien conocido (ver por ejemplo [1, X, 1.4]), nos será de utilidad más adelante.

Lema 2.1 *Si se tiene una sucesión exacta corta en $\Lambda\text{-mod}$*

$$0 \longrightarrow L \longrightarrow M \longrightarrow N \longrightarrow 0$$

Entonces:

- a) $\text{dp}_\Lambda N \leq \sup\{\text{dp}_\Lambda M, \text{dp}_\Lambda L + 1\}$, y se da la igualdad si y solamente si es que $\text{dp}_\Lambda M \neq \text{dp}_\Lambda L$.

- b) $\text{dp}_\Lambda L \leq \sup\{\text{dp}_\Lambda M, \text{dp}_\Lambda N - 1\}$ y se da la igualdad si y solamente si es que $\text{dp}_\Lambda M \neq \text{dp}_\Lambda N$.
- c) $\text{dp}_\Lambda M \leq \sup\{\text{dp}_\Lambda L, \text{dp}_\Lambda N\}$ y se da la igualdad si y solamente si es que $\text{dp}_\Lambda N \neq \text{dp}_\Lambda M + 1$.

Denotaremos por S^∞ a la suma directa de los Λ -módulos simples de dimensión proyectiva infinita (uno por cada clase de isomorfismo). De este modo, P^∞ es la cobertura proyectiva de S^∞ .

De manera análoga, $S^{<\infty}$ denotará a la suma directa de los módulos simples de dimensión proyectiva finita (uno por cada clase de isomorfismo). Además, definamos α_Λ mediante:

$$\alpha_\Lambda = \begin{cases} \text{dp}_\Lambda S^{<\infty} & \text{si } S^{<\infty} \neq 0, \\ 0 & \text{si } S^{<\infty} = 0. \end{cases}$$

Finalmente el índice de M en S^∞ , $[M : S^\infty]$, es el número de factores de composición (no necesariamente distintos) de M cuya dimensión proyectiva es infinita. El índice $[M : S^{<\infty}]$ se define de manera análoga. Es inmediato entonces observar los siguientes hechos, que usaremos libremente en adelante (ver también el Lema (2.3)):

Observación 2.2 Dado un Λ -módulo M , entonces:

- a) $[M : S^\infty] = 0$ implica que $\text{dp}_\Lambda M \leq \alpha_\Lambda$,
- b) $[M : S^\infty] = 0$ si, y solamente si es que $\text{Hom}_\Lambda(P^\infty, M) = 0$.

Dada una subcategoría $\mathcal{F} \subseteq \Lambda\text{-mod}$, diremos que un Λ -módulo M es filtrado por $\mathcal{F}$ si es que existe una cadena finita de submódulos de M :

$$0 = M_0 \subseteq M_1 \subseteq \cdots \subseteq M_n = M$$

tales que $M_i/M_{i-1} \in \mathcal{F}$ para $i \in \{1, 2, \dots, n\}$.

Recordemos ahora la construcción del funtor $S : \Lambda\text{-mod} \longrightarrow \Lambda\text{-mod}$ de [3].

En $\Lambda\text{-mod}$ la relación $\geq$ definida por $C_1 \geq C_2$ si y solamente si es que existe un epimorfismo $C_1 \twoheadrightarrow C_2$ es una relación de orden. El Lema (3.3) de [3] establece que, dado un Λ -módulo M , la familia de cocientes de M filtrados por $S^{<\infty}$ admite un único elemento maximal, que denotamos por $\mathcal{C}(M)$. Notemos que por construcción se tiene $[\mathcal{C}(M) : S^\infty] = 0$.

Dado que $\mathcal{C}(M)$ es un cociente de M , existe un epimorfismo $p_M : M \twoheadrightarrow \mathcal{C}(M)$. Por definición, $S(M)$ es el núcleo de p_M . Esto define S en los objetos de $\Lambda\text{-mod}$. Por otro lado, para un morfismo $f : M \longrightarrow N$, tenemos que $p_N f(M)$ es un cociente de M contenido en $\mathcal{C}(N)$, que es filtrado por $S^{<\infty}$.

De este modo obtenemos la existencia de un epimorfismo $\mathcal{C}(f) : \mathcal{C}(M) \twoheadrightarrow p_N f(M)$, lo que, por paso al núcleo proporciona un morfismo $S(f) : S(M) \longrightarrow S(N)$.

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \longrightarrow & S(M) & \longrightarrow & M & \xrightarrow{p_M} & \mathcal{C}(M) \longrightarrow 0 \\ & & \downarrow S(f) & & \downarrow f & & \downarrow \\ 0 & \longrightarrow & S(N) & \longrightarrow & N & \xrightarrow{p_N} & \mathcal{C}(N) \longrightarrow 0. \end{array}$$

El siguiente Lema ([3, 3.4]) resume algunas propiedades del funtor S que utilizaremos más adelante.

Lema 2.3 $S : \Lambda\text{-mod} \longrightarrow \Lambda\text{-mod}$ es un funtor aditivo que tiene las siguientes propiedades:

- a) $\text{dp}_\Lambda M < \infty$ si y solamente si es que $\text{dp}_\Lambda S(M) < \infty$,
- b) Si $[M : S^\infty] \neq 0$, entonces $\text{top } S(M) \in \text{add } S^\infty$,
- c) $\text{dp}_\Lambda M \leq \sup\{\text{dp}_\Lambda S(M), \alpha_\Lambda\}$,
- d) S preserva los epimorfismos y los monomorfismos,
- e) Si $[M : S^\infty] = 0$ entonces $S(M) = 0$.

3 Resultados

Dado $M_0 \in P^\infty\text{-mod}$, el resultado de Auslander mencionado en la introducción garantiza que

$$P^\infty \otimes_\Gamma \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, M_0) \simeq M_0.$$

Si M es un Λ -módulo arbitrario, esto no es cierto. Sin embargo $\text{Hom}_\Lambda(P^\infty, M)$ sigue siendo un Γ -módulo, de modo que, de nuevo gracias al resultado de Auslander, debe existir un Λ -módulo $M' \in P^\infty\text{-mod}$ tal que

$$\text{Hom}_\Lambda(P^\infty, M) \simeq \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, M').$$

Consecuentemente tendremos entonces

$$\begin{aligned} P^\infty \otimes_\Gamma \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, M) &\simeq P^\infty \otimes_\Gamma \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, M') \\ &\simeq M'. \end{aligned}$$

En lo que sigue construiremos concretamente el módulo M' , y veremos que además tiene algunas propiedades adicionales:

Proposición 3.1 Dado un Λ -módulo M , existe $M' \in P^\infty\text{-mod}$, tal que

- a) $\text{Hom}_\Lambda(P^\infty, M) \simeq \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, M')$
- b) $\text{dp}_\Lambda M < \infty$ si y solamente si es que $\text{dp}_\Lambda M' < \infty$, y, en este caso

$$\begin{aligned} \text{dp}_\Lambda M' &\leq \max\{\text{dp}_\Lambda S(M), \alpha_\Lambda\} \\ &\leq \max\{\text{dp}_\Lambda M - 1, \alpha_\Lambda\}. \end{aligned}$$

Demostración: La demostración de a) es la discusión que precede el enunciado de la Proposición. El enunciado de b) seguirá de la construcción de M' y del Lema (2.1). Tenemos dos casos distintos a tratar, según $[M : S^\infty]$ sea cero o no.

Supongamos primero que $[M : S^\infty] = 0$, es decir que M no tiene factores de composición de dimensión proyectiva infinita. En virtud de la Observación (2.2), tenemos que

$$\text{Hom}_\Lambda(P^\infty, M) = 0 \quad (1)$$

con lo que podemos tomar $M' = 0$ y no hay nada que demostrar.

Podemos entonces suponer que $[M : S^\infty] \neq 0$. Consideremos la sucesión exacta corta

$$0 \longrightarrow \mathcal{S}(M) \longrightarrow M \longrightarrow \mathcal{C}(M) \longrightarrow 0. \quad (2)$$

Como $\mathcal{C}(M)$ es filtrado por $S^{<\infty}$, tenemos que $[\mathcal{C}(M) : S^\infty] = 0$. En virtud de la exactitud de $\text{Hom}_\Lambda(P^\infty, -)$ y la Observación (2.2), tenemos entonces

$$\text{Hom}_\Lambda(P^\infty, \mathcal{S}(M)) \simeq \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, M). \quad (3)$$

Además el Lema (2.3), parte b), da que la cobertura proyectiva de $\mathcal{S}(M)$, que llamaremos P_0 , está en $\text{add } P^\infty$. Tenemos entonces un diagrama cuya línea y columna son exactas:

$$\begin{array}{ccccccc} & & 0 & & & & \\ & & \downarrow & & & & \\ & & \mathcal{S}\Omega_\Lambda \mathcal{S}(M) & & & & \\ & & \downarrow i & & & & \\ 0 & \longrightarrow & \Omega \mathcal{S}(M) & \xrightarrow{f} & P_0 & \longrightarrow & \mathcal{S}(M) \longrightarrow 0 \\ & & \downarrow & & & & \\ & & \mathcal{C}\Omega_\Lambda \mathcal{S}(M) & & & & \\ & & \downarrow & & & & \\ & & 0 & & & & \end{array}$$

Sea $M' = \text{Coker } fi, j$ obtenido de i por paso a los cónucleos, y $K = \text{Ker } j$. El lema de la serpiente nos da un diagrama conmutativo con líneas y columnas exactas:

$$\begin{array}{ccccccc} & & 0 & \longrightarrow & 0 & \longrightarrow & K \\ & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ 0 & \longrightarrow & \mathcal{S}\Omega_\Lambda \mathcal{S}(M) & \xrightarrow{fi} & P_0 & \longrightarrow & M' \longrightarrow 0 \\ & & \downarrow i & & \parallel & & \downarrow \\ & & \Omega_\Lambda \mathcal{S}(M) & \xrightarrow{f} & P_0 & \longrightarrow & \mathcal{S}(M) \longrightarrow 0 \\ & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ & & \mathcal{C}\Omega_\Lambda \mathcal{S}(M) & \longrightarrow & 0 & \longrightarrow & 0 \longrightarrow 0 \end{array}$$

de modo que $K \simeq \mathcal{C}\Omega_\Lambda \mathcal{S}(M)$.

Al aplicar el funtor $\text{Hom}_\Lambda(P^\infty, -)$ se obtiene otro diagrama conmutativo de líneas exactas. El hecho que $[\mathcal{C}\Omega_\Lambda \mathcal{S}(M) : S^\infty] = 0$, nos dice que:

$$\begin{aligned} \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, K) &\simeq \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, \mathcal{C}\Omega_\Lambda \mathcal{S}(M)) \\ &\simeq 0. \end{aligned}$$

Consecuentemente

$$\begin{aligned} \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, M) &\simeq \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, \mathcal{S}(M)) \\ &\simeq \text{Hom}_\Lambda(P, M). \end{aligned}$$

Supongamos que $[\Omega_\Lambda \mathcal{S}(M) : S^\infty] \neq 0$. Esto implica que $\text{top } \mathcal{S}\Omega_\Lambda \mathcal{S}(M) \in \text{add } S^\infty$, de nuevo gracias al Lema (2.3). Esto a su vez implica que la cobertura proyectiva de $\mathcal{S}\Omega_\Lambda \mathcal{S}(M)$ está en $\text{add } P^\infty$. Como también es el caso para P_0 , tenemos efectivamente $M' \in P^\infty\text{-mod}$, tal como queríamos. El Lema (2.3), parte c) y la sucesión exacta (2) dan que $\text{dp}_\Lambda M < \infty$ si y solamente si $\text{dp}_\Lambda \mathcal{S}(M) < \infty$. Además, como $K \simeq \mathcal{C}\Omega_\Lambda \mathcal{S}(M)$, tenemos, gracias a la Observación 2.2, a), que $\text{dp}_\Lambda K \leq \alpha$. Así, gracias el Lema (2.1), aplicado a la tercera columna del diagrama precedente, nos dice que $\text{dp}_\Lambda \mathcal{S}(M) < \infty$ si y solo si es que $\text{dp}_\Lambda M' < \infty$. Las desigualdades deseadas siguen del Lema (2.1).

Si, al contrario, tenemos que $[\Omega_\Lambda \mathcal{S}(M) : S^\infty] = 0$ tenemos, por el enunciado b) de la Observación 2.2, que $\text{Hom}_\Lambda(P^\infty, \Omega_\Lambda \mathcal{S}(M)) = 0$, lo que implica que

$$\begin{aligned} \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, P_0) &\simeq \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, \mathcal{S}(M)) \\ &\simeq \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, M) \end{aligned}$$

con lo que P_0 es el módulo M' que buscábamos. □

Observación 3.2 Las sucesiones exactas en $P^\infty\text{-mod}$ no necesariamente son exactas en $\Lambda\text{-mod}$, incluso si la primera es una subcategoría plena de la segunda. Es más, el funtor $P^\infty \otimes_\Gamma : \Gamma\text{-mod} \longrightarrow P^\infty\text{-mod}$ es exacto, pero el funtor $P^\infty \otimes_\Gamma : \Gamma\text{-mod} \longrightarrow \Lambda\text{-mod}$ no.

Proposición 3.3 Sea $M \in \Lambda\text{-mod}$, entonces:

- Si P_0 es la cobertura proyectiva de $\mathcal{S}(M)$, $\text{Hom}_\Lambda(P^\infty, P_0)$ es la cobertura proyectiva de $\text{Hom}_\Lambda(P^\infty, M)$ en $\Gamma\text{-mod}$.
- $\Omega_\Gamma^n \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, M) \simeq \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, (\Omega_\Lambda \mathcal{S})^n M)$.

Demostración: a) Notemos primero que, de nuevo, si $[M, S^\infty] = 0$, tendríamos, por la Observación (2.2), parte b) que $\text{Hom}_\Lambda(P^\infty, M) = 0$; y por el Lema (2.3), parte e), $\mathcal{S}(M) = 0$, con lo que no habría nada que demostrar.

Sin pérdida de generalidad podemos entonces suponer que $[M, S^\infty] \neq 0$. Recordemos además que la Ecuación (3) nos dice que $\text{Hom}_\Lambda(P^\infty, M) \simeq \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, \mathcal{S}(M))$. Sea $f : P_0 \rightarrow \mathcal{S}(M)$ la cobertura proyectiva de $\mathcal{S}(M)$. Tenemos entonces una sucesión exacta corta:

$$0 \longrightarrow \Omega_\Lambda \mathcal{S}(M) \xrightarrow{g} P_0 \xrightarrow{f} \mathcal{S}(M) \longrightarrow 0$$

Aplicando el funtor $\text{Hom}_\Lambda(P^\infty, -)$ obtenemos una sucesión exacta corta

$$0 \longrightarrow \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, \Omega_\Lambda \mathcal{S}(M)) \xrightarrow{f_*} \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, P_0) \xrightarrow{g_*} \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, \mathcal{S}(M)) \longrightarrow 0$$

Donde $f_* = \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, f)$, y $g_* = \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, g)$. Como vimos en la demostración de la Proposición (3.1), $P_0 \in \text{add } P^\infty$, de modo que $\text{Hom}_\Lambda(P^\infty, P_0)$ es un Γ -módulo proyectivo. Para demostrar que $\text{Hom}_\Lambda(P^\infty, g)$ es una cobertura proyectiva, debemos demostrar que es un morfismo superfluo ([1, VIII, (2.1)]), o, de manera equivalente, que $\text{Ker } \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, g)$, está contenido en el radical de $\text{Hom}_\Lambda(P^\infty, P_0)$. Dada la exactitud de la sucesión precedente, esto es equivalente a mostrar que $\text{Hom}_\Lambda(P^\infty, f)$ está en τ_Γ .

Supongamos que no es el caso. Dado que los Γ -módulos proyectivos son de la forma $\text{Hom}_\Lambda(P^\infty, P')$ con $P' \in \text{add } P^\infty$ esto equivale a suponer que existe un factor directo indescomponible P'_0 de P_0 tal que la composición de f con la proyección canónica π de P^∞ en P'_0

$$\Omega_\Lambda \mathcal{S}(M) \xrightarrow{f} P_0 \xrightarrow{\pi} P'_0$$

induce un morfismo:

$\text{Hom}_\Lambda(P^\infty, \pi f) : \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, P_0) \rightarrow \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, P'_0)$ que no está en τ_Γ . Como $\text{Hom}_\Lambda(P^\infty, P'_0)$ es proyectivo indescomponible, tenemos que $\text{Hom}_\Lambda(P^\infty, \pi f)$ es una retracción con lo que todo morfismo $P^\infty \rightarrow P'_0$ se factoriza por πf . Pero P'_0 es factor directo de P^∞ , así que tenemos una proyección canónica $p : P^\infty \rightarrow P'_0$. Decir que ésta se factoriza por πf implica que πf no está en τ_Λ lo que contradice el hecho que f si está en τ_Λ .

b) Para $n = 0$ no hay nada que probar, y para $n = 1$, el resultado sigue inmediatamente de la parte a) y la sucesión (3). Para $n \geq 2$ se procede por inducción obvia.

□

Proposición 3.4 Sea $M \in \Lambda\text{-mod}$. Entonces:

- a) $\text{dp}_\Lambda M \leq \max\{n + \text{dp}_\Lambda(\Omega \mathcal{S})^n M, \alpha_\Lambda + n - 1\}$
- b) Si es que $\text{dp}_\Gamma \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, M) \leq s < \infty$, entonces $\text{dp}_\Lambda M \leq \alpha_\Lambda + s + 1 < \infty$.

Demostración: a) Por el Lema (2.1) tenemos que

$$\begin{aligned} \text{dp}_\Lambda M &\leq \sup\{\text{dp}_\Lambda \mathcal{S}(M), \alpha_\Lambda\} \\ &\leq \sup\{1 + \text{dp}_\Lambda \Omega \mathcal{S} M, \alpha_\Lambda\}, \end{aligned}$$

de modo que el enunciado es verdadero para $n = 1$. Supongamos ahora que la desigualdad se cumple para $n - 1 \geq 1$. Tenemos entonces:

$$\begin{aligned} \text{dp}_\Lambda M &\leq \sup\{n - 1 + \text{dp}_\Lambda(\Omega \mathcal{S})^{n-1} M, \alpha_\Lambda + n - 2\} \\ &\leq \sup\{n - 1 + \sup\{\text{dp}_\Lambda \mathcal{S}(\Omega \mathcal{S})^{n-1} M, \alpha_\Lambda\}, \alpha_\Lambda + n - 2\} \\ &\leq \sup\{n + 1 + \alpha_\Lambda, \text{dp}_\Lambda \mathcal{S}(\Omega \mathcal{S})^{n-1} M + n - 1\} \\ &\leq \sup\{n + 1 + \alpha_\Lambda, 1 + \text{dp}_\Lambda(\Omega \mathcal{S})^n M + n - 1\} \\ &= \sup\{\text{dp}_\Lambda(\Omega \mathcal{S})^n M + n, \alpha_\Lambda + n + 1\} \end{aligned} \quad (3)$$

b) Supongamos que $\text{dp}_\Gamma \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, M) \leq s < \infty$, de modo que $\Omega_\Gamma^{s+1} \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, M) = 0$, así que en virtud de la Proposición (3.3) tenemos que

$$\text{Hom}_\Lambda(P^\infty, (\Omega \mathcal{S})^{s+1}(M)) = 0$$

lo que implica que $\text{dp}_\Lambda(\Omega \mathcal{S})^{s+1} M \leq \alpha_\Lambda$. Por la parte a) tenemos entonces que

$$\begin{aligned} \text{dp}_\Lambda M &\leq \sup\{s + 1 + \text{dp}_\Lambda(\Omega \mathcal{S})^{s+1} M, \alpha_\Lambda + s\} \\ &\leq \sup\{s + 1 + \alpha_\Lambda, \alpha_\Lambda + 1\} \\ &\leq \alpha_\Lambda + s + 1. \end{aligned}$$

□

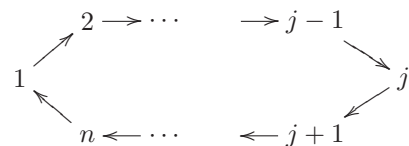
Corolario 3.5 Para todo Γ -módulo simple $_\Gamma S$ se tiene $\text{dp}_\Gamma S = \infty$.

Demostración: Es claro que $_\Gamma S \simeq \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, {}_\Lambda S')$ para algún Λ -módulo simple S' que es factor directo de S^∞ , de modo que $\text{dp}_\Lambda S' = \infty$. Por el resultado precedente se tiene que $\text{dp}_\Gamma S = \infty$.

□

Notemos que el corolario precedente es válido solamente en el caso en que P^∞ es la suma directa de todos los Λ -módulos proyectivos indescomponibles cuyo top tiene dimensión global infinita. El siguiente ejemplo muestra que al dejar de lado alguno de estos proyectivos, se puede obtener un álgebra de dimensión global arbitraria.

Ejemplo 3.6 Sean $\mathbb{k}$ un cuerpo, $\tilde{\mathbb{A}}_n$ el ciclo orientado de longitud n , I el ideal de $\mathbb{k}\tilde{\mathbb{A}}_n$ generado por los caminos de longitud dos y $\Lambda = \mathbb{k}\tilde{\mathbb{A}}_n/I$. Tenemos que $\text{dp}_\Lambda S_i = \infty$ para $i \in \{1, \dots, n\}$.



Si tomamos $P = P_1 \oplus \cdots \oplus P_{n-1}$, entonces $\Gamma = \text{End}_\Lambda(P)^{op} \simeq \mathbb{k}\mathbb{A}_{n-1}/J$ (donde J es el ideal generado por los caminos de longitud dos) es un álgebra triangular tal que $\dim \text{gl } \Gamma = \text{dp}_\Gamma \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, S_{n-1}) = n - 2$.

Observación 3.7 En la Proposición (2.1) mostramos que si es que $\text{dp}_\Gamma \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, M) \leq s$, entonces $\text{dp}_\Lambda M \leq \alpha_\Lambda + s + 1$. En el otro sentido, si pudiésemos encontrar una constante β tal que $\text{dp}_\Lambda M \leq s$ implica $\text{dp}_\Gamma \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, M) \leq s + \beta$, tendríamos

$$\text{fin dim } \Lambda < \infty \iff \text{fin dim } \Gamma < \infty.$$

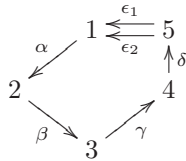
En efecto, supongamos que tenemos una tal constante β y que $\text{fin dim } \Lambda < \infty$. Sea $X \in \Gamma\text{-mod}$ con $\text{dp}_\Gamma X < s$. Como $X = \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, M)$ para algún $M \in P^\infty\text{-mod}$ con $\text{dp}_\Lambda M \leq \text{fin dim } \Lambda$, tendríamos entonces

$$\text{dp}_\Gamma X = \text{dp}_\Gamma \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, M) \leq \text{fin dim } \Lambda + \beta$$

La otra implicación se muestra de la misma manera.

Desafortunadamente, no es posible obtener una tal constante β , como el siguiente ejemplo muestra:

Ejemplo 3.8 Sea Q el carcaj



Consideremos el ideal $I = \langle \alpha\beta\gamma, \beta\gamma\delta\epsilon_1, \beta\gamma\delta\epsilon_2, \delta\epsilon_2, \gamma\delta\epsilon_1\alpha\beta, \epsilon_2\alpha\beta \rangle$, y sea $\Lambda = \mathbb{k}Q/I$. Un cálculo directo muestra que $\text{dp}_\Lambda S_2 = \text{dp}_\Lambda S_3 = \text{dp}_\Lambda S_4 = \text{dp}_\Lambda S_5 = \infty$, y $\text{dp}_\Lambda S_1 = 3$, de modo que $P^\infty = P_2 \oplus P_3 \oplus P_4 \oplus P_5$, y $\alpha_\Lambda = 3$. Si, como antes, denotamos por Γ al álgebra $\text{End}_\Lambda(P^\infty)^{op}$, tenemos que $\text{dp}_\Lambda P_1 = 0$, pero $\text{dp}_\Gamma \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, P_1) = \infty$.

Terminemos determinando el Λ -módulo M' tal que

$$P^\infty \otimes_\Gamma \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, P_1) \simeq M'.$$

Notemos que $P_1 = \begin{smallmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{smallmatrix}$. De acuerdo a la construcción de la Proposición (3.1) tenemos:

$$\mathcal{S}(P_1) = \begin{smallmatrix} 2 \\ 3 \end{smallmatrix}, \quad \Omega_\Lambda \mathcal{S}(P_1) = \begin{smallmatrix} 4 \\ 5 \end{smallmatrix}, \quad \text{y } \mathcal{S}(\Omega_\Lambda \mathcal{S}(P_1)) = \begin{smallmatrix} 4 \\ 5 \end{smallmatrix}.$$

Así, el conúcleo del morfismo $\begin{smallmatrix} 4 \\ 5 \end{smallmatrix} \xrightarrow{f} \begin{smallmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{smallmatrix}$ es $\begin{smallmatrix} 2 \\ 3 \end{smallmatrix}$,

de modo que

$$P^\infty \otimes_\Gamma \text{Hom}_\Lambda(P^\infty, P_1) = \begin{smallmatrix} 2 \\ 3 \end{smallmatrix}.$$

El módulo $\begin{smallmatrix} 2 \\ 3 \end{smallmatrix}$ tiene dimensión proyectiva 2. En efecto, su resolución proyectiva es:

$$0 \longrightarrow \begin{smallmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{smallmatrix} \longrightarrow \begin{smallmatrix} 4 \\ 5 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{smallmatrix} \longrightarrow \begin{smallmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{smallmatrix} \longrightarrow \begin{smallmatrix} 2 \\ 3 \end{smallmatrix} \longrightarrow 0.$$

Referencias bibliográficas

- [1] I. Assem. *Algèbres et modules: cours et exercices*. Enseignement des mathématiques. Les Presses de l'Université d'Ottawa–Masson, Ottawa–Paris, 1997.
- [2] M. Auslander, I. Reiten, and S.O. Smalø. *Representation Theory of Artin Algebras*. Number 36 in Cambridge Studies in Advanced Mathematics. Cambridge University Press, Cambridge, 1995.
- [3] F. Huard, M. Lanzilotta, and O. Mendoza. Finitistic dimension through infinite projective dimension. preprint, 2007.

ALUMINOSILICATOS MESOPOROSOS CATALÍTICAMENTE ACTIVOS OBTENIDOS USANDO EL BIOPOLÍMERO QUITOSANO COMO AGENTE FORMADOR DE POROS.

E. Alexis Hidrobo^{*1} Jaime Retuert² Paulo Araya²

¹ Colegio de Ciencias e Ingeniería, USFQ.

² Centro para la Investigación Multidisciplinaria Avanzada en Ciencia de los Materiales (CIMAT) y Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Resumen

Este trabajo presenta la síntesis, y caracterización parcial, de aluminosilicatos mesoporosos obtenidos a partir de un xerogel híbrido organo-inorgánico, utilizando el biopolímero quitosano conjuntamente con un proceso de tratamiento hidrotermal como herramientas de modelación estructural. Mediante comparación con las características de su contraparte blanco, que carece de quitosano, se establece el papel del biopolímero como generador de mesoporosidad y estabilizador de la red.

Mediante la reacción de craqueo catalítico de Cumeno se determina que el material posee, a diferencia del material preparado sin quitosano, grupos ácidos con buena estabilidad hidrotermal. Esto hace que pueda ser considerado como un potencial catalizador para la transformación de moléculas de gran tamaño.

Palabras Clave. Mesoporos, aluminosilicato, quitosano, acidez, estabilidad hidrotermal.

Introducción

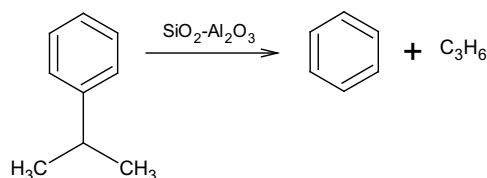
Las zeolitas son probablemente los materiales de mayor uso como catalizadores industriales, ya sea en refinación de petróleo, petroquímica y síntesis orgánica para la producción de química fina. Esta versatilidad se debe a sus extraordinarias propiedades de selectividad, acidez y capacidad de adsorción. Sin embargo, debido al tamaño de sus canales, las zeolitas presentan problemas de difusión de especies, pudiendo “transformar” solamente aquellas moléculas con tamaños en el rango de 5 a 15 Å. Esto hace que presenten una limitación importante para aplicaciones que implican el uso de moléculas de mayor tamaño [1,2].

Durante los últimos años los investigadores persiguen obtener materiales mesoporosos, que posean diámetros de poro entre 20 a 200 Å, lo que permite trabajar con moléculas de tamaños mayores. Estos materiales, con una morfología controlada, tienen usos potenciales en catálisis, procesos de separación (mallas moleculares) y cromatografía [3].

Dentro de esta perspectiva, se han obtenido sílicas, alúminas, y sílica-alúminas mesoporosas utilizando aminas, surfactantes, polímeros y copolímeros en bloque como agentes de modelación estructural [4-6]. Una vez realizada la calcinación, el material final se obtiene con un tamaño de poro que, en forma general, está en relación con las dimensiones de la estructura orgánica utilizada como modelador (template).

El presente trabajo se enmarca dentro de esta línea de investigación acerca de materiales mesoporosos; a diferencia de los estudios reportados por otros autores, en esta investigación se utiliza el biopolímero quitosano como agente modelador estructural, y es un complemento a estudios realizados por nosotros anteriormente

[7]. En el presente se reportan las actividades catalíticas de nuestros materiales para la reacción de craqueo del cumeno, molécula orgánica usada comúnmente como un indicador de actividad. Es conocido que una vez que la molécula de cumeno se rompe por acción del soporte catalítico, se obtienen benceno y propileno, tal como lo indica la reacción [8]:



Materiales y métodos

1.1 reparación de la Solución de Quitosano.

Inicialmente se prepara una solución de ácido fórmico al 5 %. Se toma el quitosano en la cantidad adecuada para obtener una solución al 1 % en ácido (1 g de quitosano por 100 ml de solución del ácido). El sistema se deja agitar durante toda una noche o hasta lograr la máxima disolución del quitosano (se observan pocos grumos en el seno del líquido). Al día siguiente se filtra al vacío con un embudo poroso de filtración lenta para retener las impurezas con que viene el quitosano y los grumos formados por quitosano no disuelto. La solución que se obtiene después del filtrado es la que se utiliza en todas las síntesis en donde se encuentra involucrado el quitosano.

1.2 Preparación del Composito SAQ

La síntesis consiste en dos etapas: La primera de ellas es la síntesis del composito; la segunda etapa es su estabilización mediante tratamiento hidrotermal.

Para la primera etapa se disuelven 30 g de nitrato de aluminio en 20 g de agua destilada. Para obtener pH 1 se añaden gotas de HNO_3 . La solución se agita a 300 rpm. Paso seguido se añaden 13.6 g de tetraetil-ortosilicato (TEOS) gota a gota y manteniendo la agitación. Una vez que todo el TEOS se ha adicionado se mantiene la agitación durante una hora adicional. A continuación se añaden 20 ml de la solución de quitosano preparada previamente. Conforme aumenta la viscosidad del sistema se aumenta la agitación hasta llegar a las 500 rpm, continuando la agitación durante una hora. Seguidamente se adicionan gotas de NH_4OH hasta obtener el pH de precipitación del sistema (pH=10). El material se deja secar durante toda la noche bajo condiciones ambientales, y luego se procede a lavar con abundante agua destilada y finalmente con etanol.

En la segunda etapa la muestra se separa en dos partes: La primera se calcina a 550 °C durante 12 horas, mientras que la segunda se somete a tratamiento hidrotermal en un reactor de acero, provisto de un vaso de teflón, a 150 °C durante 24 horas [7]. Una vez tratado, el material se filtra, se lava con agua destilada hasta pH 7 y finalmente se seca. La calcinación del material seco se efectúa calentando con un gradiente de 10 °C/min hasta 550 °C temperatura que se mantiene durante 12 horas.

1.3 Reacción de craqueo de cumeno.

La reacción se realiza en un reactor convencional de lecho fijo operado bajo condiciones diferenciales. La carga de catalizador es de 100 mg, su activación se realiza a 350 °C con un flujo de nitrógeno de 1 ml/s durante 30 minutos. La temperatura de la reacción es 175 °C. Los productos de reacción se analizan en un cromatogaro de gases H.P. provisto de un detector de conductividad térmica. Los productos de la reacción se determinan cada 10 minutos hasta completar 2 horas.

Resultados y discusión

Las propiedades texturales de las muestras se indican en la tabla 1. Las distribuciones de poro señalan que tanto los sólidos obtenidos con quitosano como la muestra que carece del polímero (muestra blanco) son mesoporosas. Sin embargo cuando las muestras se someten a tratamiento hidrotermal (TH) se observa un aumento substancial en el tamaño de poro (al doble), y en consecuencia una disminución en el área superficial. Es importante observar que esta disminución es mayor para la muestra blanco que para el aluminosilicato que contiene quitosano, esto indica que la presencia del biopolímero hace que la red en formación sea más estable hacia las condiciones hidrotermales.

La unión entre las especies quitosano-silice probablemente ocurre a través de los grupos amino o amido residual del quitosano y los grupos silanol de la red en formación como lo indica la figura 1. De esta manera, la red se forma mediante reacciones de hidrólisis y condensación sucesivas, para posteriormente densificarse alrededor de microdominios de quitosano.

lisis y condensación sucesivas, para posteriormente densificarse alrededor de microdominios de quitosano.

Muestra	Área sup. m^2/g	Diám. Poro Å	Act. Relat. craqueo
ZSM-5	402	microporos	0.87
LZY-84	617	microporos	1
SAQ	573	50	0.35
SAQ-TH	433	100	0.13
SA Blanco	487	32	0.31
SA Blanco-TH	296	66	0.025

TH: Tratamiento hidrotermal durante 24 h a 150 °C.

Tabla 1. Propiedades texturales y Actividades relativas en el craqueo catalítico de cumeno para Aluminosilicatos mesoporosos y zeolitas ZSM-5 y LZ-84.

En vista de lo anterior, la red obtenida presenta buena estabilidad hacia las condiciones hidrotermales; lo cual, como se verá más adelante, se refleja en la actividad de la muestra.

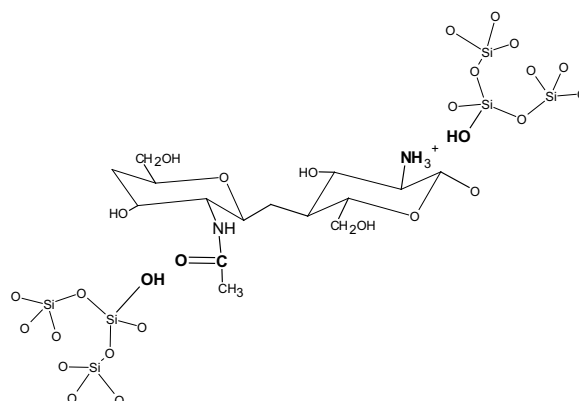


Figura 1. Interacción entre el quitosano y las especies de red en formación.

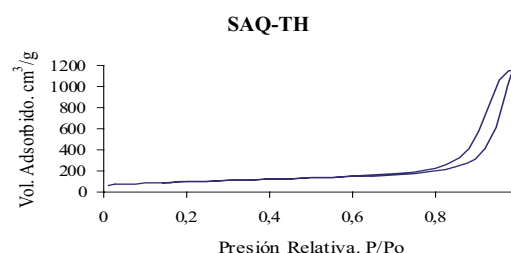


Figura 2. Isothermas de adsorción de nitrógeno para el aluminosilicato mesoporoso después de someterse a TH durante 24 h a 150 °C.

La isoterma de adsorción-desorción de la muestra una vez sometida al TH se indica en la figura 2. Como se observa, esta presenta el típico loop de histéresis que se obtiene debido a la condensación capilar, y que corresponde a una combinación entre las isothermas tipo IV-H2, que se encuentran en materiales con poros interconectados, y las isothermas tipo IV-H3, que

normalmente se asigna a materiales con poros en forma de ranura. La adsorción a presiones relativas bajas se incrementa rápidamente, lo que sugiere que una pequeña cantidad de microporos se encuentra presente. La forma irregular de las isothermas, con loop de histéresis en el rango 0.6-0.8 de presiones parciales, indica que el tamaño de los poros no es uniforme y que su diámetro promedio es grande [9].

Con el fin de determinar la estructura de las muestras y saber si presentan algún grado de orden se determinó su patrón de difracción. Como se observa en la figura 3, la muestra después del tratamiento hidrotermal presenta la típica curva que corresponde a los sólidos amorfos. Sin embargo, es importante recalcar que el material no presenta ningún signo de cristalinidad previo al tratamiento. Estos signos son claros indicadores que el proceso de formación de la red alrededor del quitosano, para obtener la estructura mesoporosa, se lleva a cabo de una manera desordenada; tal como ocurre en aquellos casos de formación de sílice o sílice-alumina sin la presencia de un director estructural o template del tipo surfactante [6,7].

En la literatura se encuentran diversas rutas alternativas para la síntesis de materiales mesoporosos que consisten en el empleo de moléculas no-surfactantes como moldes. Con este fin se ha empleado compuestos orgánicos como gelatina [10] y D-glucosa, que pueden ser removidos por extracción con solvente o calcinación. Consideramos que el quitosano puede incluirse en este grupo de moléculas molde, alrededor de la cual la red se estructura mediante reacciones sucesivas de hidrólisis y condensación [11]. Lo anterior nos lleva a establecer que el uso del término “agente formador de poro” es más apropiado que el de template o director estructural.

En lo que a la actividad catalítica se refiere, la tabla 1 muestra que las zeolitas (ZSM-5 y LZY-84) son supremamente activas hacia el craqueo del cumeno. Los aluminosilicatos obtenidos con quitosano y los aluminosilicatos blanco tienen actividades relativas muy parecidas entre sí, y que son de alrededor de un tercio de las actividades presentadas por las zeolitas.

Cuando los materiales se someten a proceso hidrotermal durante 24 h a 150 °C se observa que las actividades hacia la obtención de benceno varían en forma importante. La parte inferior de la tabla 1 muestra que los aluminosilicatos que fueron sintetizados con quitosano presentan mayor actividad después del TH que aquellos que carecen del quitosano. Como ya se discutió anteriormente, se cree que esto se debe a que en los materiales que contienen quitosano la red inorgánica se densifica en torno a pequeños dominios del polímero. En los materiales que carecen del quitosano en cambio, el aluminosilicato primario sufre los procesos de disolución/reprecipitación que reestructuran la red, de tal forma que el Al tetraédrico es promovido fuera de la red y por la tanto la formación de los sitios ácidos Brønsted se desfavorece. Así, la actividad de los aluminosilicatos sin quitosano es menor que aquellos en donde la red está

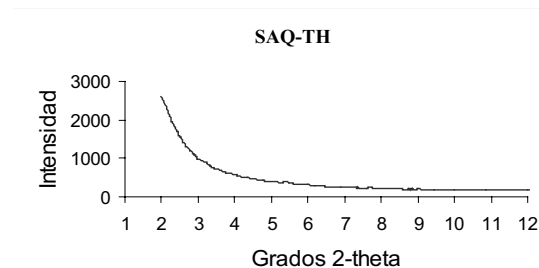


Figura 3. Patrón de difracción de rayos X para el aluminosilicato mesoporoso obtenido usando quitosano como agente formador de poros.

ligada al polímero y en donde los sitios ácidos se encuentran protegidos hacia las condiciones hidrotermales.

Con base en lo discutido, en este trabajo se establece que es posible obtener aluminosilicatos mesoporosos utilizando el biopolímero quitosano conjuntamente con un proceso de tratamiento hidrotermal como herramientas de modelación estructural.

Se considera que estos materiales tienen gran importancia, ya que mediante una síntesis muy simple, obtenida mediante precursores de Si y Al de fácil acceso, se logra producir materiales que presentan acidez tipo Brønsted estable a condiciones hidrotermales drásticas (24 h a 150 °C). Esto último se determinó mediante la reacción de craqueo de cumeno, que permite establecer que el aluminosilicato sintetizado utilizando quitosano como agente modelador de poros presenta una actividad de alrededor del 10 % en comparación con una zeolita comercial ácida como la zeolita Y ultra estable, conocida como LZY-84. Esta actividad, a su vez, es cuatro veces mayor que la del aluminosilicato sintetizado sin usar el polímero.

Finalmente, se debe decir que el uso de estos materiales puede extenderse hacia el craqueo de moléculas de tamaños mayores debido a que presentan diámetros de poro dentro del rango de los 100 Å y con volúmenes de poro sobre los 0.6 cm³/g, lo cual aumenta su interés hacia posibles aplicaciones de carácter industrial.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento de los proyectos Fondecyt 8000015 y 1010525.

Referencias bibliográficas

1. Corma, A. 1997. Chem. Rev, 97. 2373.
2. Biz, S y Occelli, M.L. 1998. Catal. Rev. Sci. Eng, 40. 329.
3. Yu. Ch.; Tian, B.; Fan, J.; Stucky, G.D.; Zhao, D. 2001. Chem. Commun, 2726.
4. Yang, Ch.; Zibrowius, B.; Schüth, F. 2003. Chem. Commun, 1772.
5. Sun, Y.; Han, Y.; Yuan, L.; Jian, Ma. D.; Xiao, F-S. 2003. J. Phys. Chem. B, 107. 1853.

6. Hidrobo, A.; Retuert, J.; Araya, P. 2003. J. Chil. Chem. Soc, 48. 3.37.
7. Hidrobo, A.; Retuert, J.; Araya, P. Wolf. E. 2003. J. Por. Mat, 10. 231.
8. Bond. G.C.; López Agudo. A.; Ratnasamy. P.; Parera. J.M. 1985. *Centros Metálicos y Centros Ácidos en Catálisis Heterogénea*. Primera Edición. Universidad de Concepción. Concepción. Chile, pp. 146.
9. Satterfield . Ch. 1991. *Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice*. Segunda Edición. Mc. Graw-Hill. USA, pp. 39-42.
10. Retuert. J.; Quijada. R.; Arias. V. 1998. Chem.. Mater, 10. 3923.
11. Retuert. J.; Quijada. R.; Arias. V.; Yazdani-Pedram. M. 2003. J. Mater. Res, 18. 2. 487.

ANÁLISIS MACRO-CINÉTICO DE LA INFILTRACIÓN QUÍMICA DE VAPOR DE CAPAS DE Si Y Si/SiC EN ESTRUCTURAS BIOMÓRFICAS DE CARBONO

Daniela Almeida S.^{*1,2}

¹ Colegio de Ciencias e Ingeniería, USFQ.

² Friedrich- Alexander Universität Erlangen – Nürnberg, Alemania.

Resumen

En este artículo se presenta el modelo matemático desarrollado para describir y predecir el proceso de infiltración y deposición de capas de Si y Si/SiC a partir de los sistemas de precursores: metiltriclorosilano (MTS)/hidrógeno y Tetracloruro de Silicio/hidrógeno. Este modelo se basa en la cinética obtenida en el análisis experimental de la deposición sobre sustratos no porosos, en el modelo geométrico desarrollado para describir la estructura porosa de las preformas de carbono y en el cálculo de Módulo de Thiele y del factor de infiltración a partir del balance de masa. Finalmente se comprobaron los resultados del modelo matemático comparando la homogeneidad de la infiltración en preformas de carbono con un microscopio SEM.

Palabras Clave: Chemical Vapor Deposition (CVD), CVI, biomorphic ceramics, infiltration factor.

Introducción

El desarrollo en las técnicas de producción de cerámicas biomórficas aumenta continuamente [1]. Cerámicas biomórficas son materiales tecnológicos obtenidos de la transformación de estructuras biológicas, llamadas preformas, hacia materiales cerámicos de alta calidad y una amplia gama de posibles aplicaciones. Las cerámicas biomórficas de carburo de silicio, SiC, han sido estudiadas exhaustivamente por su combinación única de propiedades. SiC se caracteriza por su muy buena resistencia mecánica, estabilidad térmica hasta 1000°C en atmósferas oxidantes y su resistencia química a ácidos y bases. Entre sus principales aplicaciones se encuentran su uso como monolito o recubrimientos en motores y partes que necesitan resistencia a altas temperaturas, o como protección a medios abrasivos o corrosivos [2, 3]. Entre las propiedades únicas de las estructuras biológicas se encuentran la combinación entre resistencia y estabilidad con gran flexibilidad y elasticidad, densidades muy bajas, además de su posibilidad de autocuración y auto-modificación, cosa que no se tiene en ningún material tecnológico [4, 5]. Las propiedades únicas de las cerámicas biomórficas de SiC son una combinación entre las propiedades cerámicas del SiC y de la estructura original biológica, la cual se mantiene intacta hasta un nivel de micrométrico, resultando en materiales de bajísima densidad y alta flexibilidad, con alta resistencia mecánica y dureza, así como alta estabilidad, conductividad térmica y resistencia química frente a ácidos y bases [6, 7].

En los últimos años se han desarrollado diferentes tecnologías para la obtención de cerámicas biomórficas, dando como resultado cerámicas con diferentes propiedades. Las tecnologías más utilizadas son infiltración de Si líquido [8, 9, 10], infiltración de Si gaseoso [11, 12], infiltración de vapor de SiO [11] e infiltración química de vapor [13, 14, 15]. En este trabajo, se va a tratar exclusivamente de cerámicas biomórficas producidas a través de la deposición e infiltración química de vapor (CVI, *Chemical Vapor Infiltration*) de diferentes precursores.

El proceso de ceramización por el método de CVI incluye tres pasos consecutivos [16]. En el primer paso se transforma la estructura biológica en la preforma de carbono por una reacción de pirólisis [1, 14, 17, 18]. El papel utilizado fue especialmente diseñado para este proceso de ceramización, basado únicamente en fibras gruesas de celulosa y lignina para mantener una gran porosidad de la estructura.

En el segundo paso la preforma de carbono es sometida al proceso de CVI, donde es infiltrada con el precursor en fase gaseosa a la temperatura de reacción. Los sistemas de reacción que se van a estudiar en este trabajo son: metiltriclorosilano (MTS) – hidrógeno ($\text{CH}_3\text{SiCl}_3\text{-H}_2$) y tetracloruro de silicio – hidrógeno ($\text{SiCl}_4\text{-H}_2$). El depósito sólido que se obtiene con los diferentes sistemas es Si/SiC y Si respectivamente.

El tercero y último paso consiste en la reacción en fase sólida del Si depositado con el carbono de la preforma y la combustión del carbono en exceso, para finalmente obtener la cerámica biomórfica deseada de SiC.

Este trabajo se va a enfocar en el segundo paso descrito: la ceramización por el método de CVI. Se realizará un análisis macro-cinético del mecanismo de infiltración de los precursores en fase gaseosa a través de la preforma de carbono hasta depositarse como un recubrimiento sólido en toda su superficie interior. Con este modelo se quiere predecir la homogeneidad del depósito a lo largo de la estructura porosa. Para poder realizar este análisis es de vital importancia conocer la cinética química del proceso de deposición. Para esto se realizaron investigaciones previas a la infiltración sobre sustratos no porosos, hasta obtener una ecuación cinética del proceso de deposición. A continuación se establece un modelo para la infiltración y la deposición en los sustratos porosos.

Por consiguiente este trabajo va a estar dividido en tres partes. En la primera parte se presentarán los resultados del estudio cinético de la deposición química de vapor en sustratos no porosos. En la segunda parte se presen-

tará el modelo matemático que se ha desarrollado sobre la geometría de la preforma. Y por último se combinará el modelo geométrico con la expresión cinética, para formular el modelo matemático que representa la infiltración de los gases reactivos y la deposición en la preforma de carbono. Finalmente se comprobarán los resultados matemáticos con las pruebas cerámicas.

Materiales y métodos

a) Equipo experimental

El equipo utilizado para la infiltración química de vapor es un reactor tubular para deposición química de vapor (CVD, *Chemical Vapor Deposition*) de calentamiento térmico por conducción en la pared. Los gases reactivos e inertes son dosificados por controladores de flujo másico. El precursor líquido, MTS o SiCl_4 , es evaporado y transportado por un gas inerte (helio) desde un evaporador temperado hasta el reactor. Al regular la temperatura del evaporador y el flujo del gas de arrastre se puede conocer, con ayuda de la curva de presión de vapor del precursor, la cantidad del mismo que es introducida al reactor. En éste tipo de reactor los gases introducidos llegan a la temperatura de deposición en la fase gaseosa y se forma el depósito en todas las superficies calientes. Es por esto que el reactor tubular está protegido por un folio de grafito a lo largo y ancho del mismo. Las pruebas de grafito y las preformas de carbono son colocadas al inicio de la zona isotérmica del reactor donde se ha observado una deposición homogénea [14].

b) Análisis cinético en procesos de CVD / CVI

La deposición química de vapor es un proceso complejo que involucra por el lado cinético una serie de reacciones en fase gaseosa donde se forman los reactivos intermedios, seguidas por las reacciones heterogéneas en fase sólida, donde se forman la capa sólida deseada y los productos gaseosos finales.

Por lo tanto, los pasos elementales para la formación del depósito son: difusión de película ocasionada por limitaciones en la convección del gas reactivo hasta la superficie del sustrato, adsorción y reacción superficial formando la capa sólida, más los pasos de desorción y difusión de película de los productos secundarios.

En el caso de sustratos porosos se debe incluir antes del paso de adsorción y después de la desorción adicionalmente la difusión de los precursores o los productos secundarios por los poros o infiltración. Se desea operar de tal forma, que la infiltración y deposición sea homogénea en todo el sustrato [19, 20].

Todos estos pasos ocurren en serie y, por lo tanto, el más lento de éstos es responsable de la velocidad global del proceso. Es por esto que es de suma importancia analizar en cuál régimen de parámetros se tiene una deposición o infiltración controlada por la reacción superficial, ya que sólo bajo estas condiciones se tiene una infiltración homogénea del gas reactivo y se puede formar una capa sólida homogénea en todo el sustrato poroso.

Los principales parámetros que se deben controlar y modificar para lograr la deposición e infiltración deseada son temperatura de deposición, velocidad del gas en el reactor, presión total y composición de gases reactivos.

Por lo general, se encuentran procesos controlados por difusión de película a altas temperaturas, y presiones y velocidad del gas bajas, lo que ocasiona una película gaseosa ancha y difícil de difundir, y al mismo tiempo una reacción cinética rápida, pero con baja concentración de precursor en la superficie. Por el otro lado, a temperaturas y presiones bajas y tiempos de residencia más cortos, la velocidad de reacción es el paso más lento y controla el proceso general. En sustratos porosos se debe incluir además la limitación por difusión de poros. En este caso el paso limitante se define por la geometría del sustrato y por las condiciones de difusión del gas: temperatura, presión total y presiones parciales de los precursores.

Para realizar el análisis cinético se estudiarán tanto la dinámica de fluidos, la cinética de la reacción de deposición en sustratos no porosos y finalmente la cinética en sustratos porosos.

La dinámica de fluidos incluye transporte de masa y de calor por convección y conducción, y explica su comportamiento en el reactor. El principal método experimental para la determinación de las condiciones de dinámica de fluidos del proceso de deposición es analizar la velocidad de reacción y el tiempo de residencia del gas reactivo en el reactor. En tiempos de residencia pequeños se encuentra una dependencia lineal entre el mismo y la conversión del gas reactivo en un depósito sólido. Este régimen se encuentra controlado por el flujo forzado o convección y se lo conoce como *feed rate limitation*. Este régimen se caracteriza por tener tiempos de residencia del gas muy cortos, los cuales no alcanzan a reaccionar completamente en el reactor. Al seguir aumentando el tiempo de residencia del gas se llega después de un intervalo de transición a un régimen en el cual la conversión es independiente del tiempo de residencia. En este régimen la reacción superficial controla el mecanismo de deposición. Esta conversión es al mismo tiempo la conversión máxima que se alcanza en el proceso y es el régimen de operación deseado. Si se continúa aumentando el tiempo de residencia, la conversión empieza a disminuir. Éste es el régimen de limitación por difusión de película del gas reactivo en las superficies del reactor: paredes y sustratos a depositar.

Otros criterios para conocer la dinámica de fluido durante el proceso de deposición son el cálculo de números adimensionales como los números de Reynolds, de Knudsen o de Damkohler. En este trabajo no se los tratará a detalle, pero se puede encontrar su aplicación en Almeida [1].

La cinética en procesos de CVD es compleja e involucra una serie de reacciones homogéneas en fase gaseosa y reacciones heterogéneas en fase sólida, incluyendo procesos de adsorción, desorción y reacción superficial que

forman la capa sólida deseada [20]. Sin embargo, la cinética de la deposición se puede expresar como una sola expresión global.

Los experimentos para la obtención de los datos cinéticos en sustratos no porosos se realizaron en el régimen de deposición determinado por la reacción cinética. Se asume para la velocidad de reacción un modelo de ley de potencia y se utilizan únicamente los datos experimentales al principio de la zona isotérmica del reactor para obtener los datos cinéticos deseados y minimizar el efecto de los productos gaseosos inhibidores, como HCl.

$$r_s = k_s \cdot C_{prec}^n \quad \text{Ecn. 1}$$

$$\log(r_s) = \log(k_s) + n \cdot \log(C_{prec}) \quad \text{Ecn. 2}$$

En Ecn. 1 y Ecn. 2 se presentan la forma de la ley de potencia de la velocidad de reacción y la forma linealizada logarítmica de la cual se obtiene el orden de reacción, n . Experimentalmente se conoce la velocidad de reacción superficial, r_s , en $[\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}]$, a través de la masa depositada en cada sustrato de área conocida en el tiempo definido por la duración de experimento, y la concentración de precursor en cada posición del reactor, C_{prec} , en $[\text{mol}/\text{m}^3]$ [1]. Con estos datos se obtiene de la pendiente de la curva de $\log(r_s)$ vs $\log(C_{prec})$ el orden de la reacción. Mientras que el coeficiente cinético, k_s , se obtiene despejando k_s de Ecn. 2.

En el siguiente paso se obtiene la energía de activación de la reacción superficial, E_a , y el coeficiente preexponencial, k_o , utilizando la forma logarítmica de la ley de Arrhenius de Ecn. 3. La validación de los datos cinéticos se asegura con extrapolación de datos en diagramas de paridad con $\pm 20\%$ [1].

$$\ln k_s = \ln k_o - \frac{E_a}{R} \frac{1}{T} \quad \text{Ecn. 3}$$

c) Cálculo del factor de infiltración en procesos de CVI

Los modelos matemáticos en procesos de CVI son necesarios para proveer un mejor entendimiento de la influencia de los parámetros individuales sobre las propiedades del material final, en especial con respecto al perfil de deposición en toda la estructura porosa y la porosidad final. Realizar un modelo realista de la CVI resultaría muy complicado debido a la estructura indefinida de los poros del sustrato a infiltrar. Es por esto que se realiza modelos simplificados de los procesos de deposición e infiltración. Primero se necesita determinar un modelo de la geometría de los poros, para en el siguiente paso poder establecer un balance de masa en los poros y después poder calcular la velocidad de reacción efectiva a lo largo del poro.

Una vez obtenidos los términos de la reacción cinética superficial y la velocidad de reacción efectiva en sustratos porosos es posible calcular el factor de infiltración al relacionar los dos términos (r_{eff}/r_s). El factor de infiltración (η) en los poros indica el grado de difusión de los gases dentro de la estructura sólida y la homogenei-

dad de las capas formadas. Por lo tanto, un factor de infiltración cercano a 1 indica que la difusión es rápida comparada con la reacción cinética y que las capas son homogéneas, mientras que un factor de infiltración menor a uno indica que la difusión en la estructura no es homogénea y que, por lo tanto, el recubrimiento en el centro de la preforma va a ser deficiente.

d) Métodos de caracterización

Mediante *scanning electron microscopy* (SEM/EDX Phillips XL 30) y espectroscopía Raman (Raman Spectrometer Type Renishaw Ramascope 2000) se puede validar los resultados del modelo matemático al comprobar la homogeneidad en la deposición de las preformas obtenida con la esperada [1].

Resultados y discusión

a) Análisis cinético de la deposición química de vapor de los sistemas MTS - H_2 y SiCl_4 - H_2

La expresión cinética para la velocidad de deposición de las capas cerámicas de Si/SiC y Si, se obtiene experimentalmente haciendo series de experimentos de la deposición química de vapor en sustratos no porosos y variando ciertos parámetros.

En esta serie de experimentos el primer paso es determinar el régimen en el flujo del precursor en el cual la velocidad de deposición sea determinada por la reacción cinética superficial. Como descrito anteriormente, este régimen se encuentra en tiempos de residencia entre la limitación por convección y la limitación por difusión de película. Entre estos dos regímenes se encuentra el tiempo de residencia de los gases, en el cual el proceso de deposición está determinado por la reacción cinética. La conversión alcanza su máximo y es independiente del tiempo de residencia.

En la Figura 1 se muestran los resultados de los experimentos de variación del tiempo de residencia del gas, para conocer las condiciones de operación donde el proceso se encuentra controlado por la reacción superficial. Esto es cuando la conversión es independiente del tiempo de residencia. En los sistemas MTS/ H_2 y SiCl_4/H_2 los tiempos de residencia óptimos se encuentran en 1,7 y 2,0 s, respectivamente.

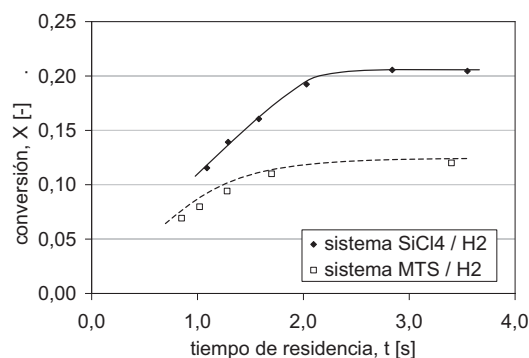


Figura 1: dependencia de la conversión con el tiempo de residencia

Parámetros	Sistema	
	MTS / H ₂	SiCl ₄ / H ₂
temperatura [°C]	800 - 1000	850 - 1050
presión total [mbar]	1000	1000
tiempo de residencia [s]	0,8 - 3,5	1,0 - 3,5
fracción molar de precursor 1 [-]	0,01 - 0,10	0,01 - 0,08
fracción molar de precursor 2 [-]	-	-
relación H ₂ / precursor [-]	0 - 90	1 - 99

Tabla 1: Variación de los diferentes parámetros en los sistemas

Datos cinéticos	Sistema	
	MTS / H ₂	SiCl ₄ / H ₂
Factor preexponencial, k_0 [cm/s (mol/cm ³) ¹⁻ⁿ]	3,30E+04	5,23E+04
Energía de activación, E_a [kJ/mol]	174	191
Orden de reacción, n [-]	0,61	0,64

Tabla 2: Datos cinéticos para la ecuación cinética de ley de

Una vez determinado el flujo volumétrico óptimo de los gases reactivos, se inicia con la variación de las demás condiciones de operación: temperatura, presión, concentración de los reactivos. Y utilizando la metodología explicada anteriormente se obtienen los valores de los parámetros cinéticos. La Tabla 1 muestra el rango de variación de las condiciones de operación en los sistemas estudiados. Y en la Tabla 2 se encuentran los resultados obtenidos del análisis cinético.

b) Cálculo del factor de infiltración

El modelo matemático desarrollado en este trabajo para predecir el factor de infiltración mediante CVI en las preformas de carbono se basa en un modelo unidimensional, considerando los cambios en la porosidad durante el proceso de deposición.

Modelo geométrico de los substratos porosos

Las propiedades de las preformas a base de papel utilizadas son únicas, ya que debido a su método de procesamiento las fibras exhiben una orientación preferible en el eje planar y los poros resultantes son anisotrópicos. El tamaño de los poros varía desde micro- hasta mesopóricos. Esta geometría compleja gobierna el transporte de masa y la difusión de los precursores gaseosos. Para simplificar esta estructura, el modelo desarrollado se basa en la microestructura de un tejido con distribución uniforme de poros de área transversal cuadrada con altura inicial a_0 y largo de poros H como se muestra en el Figura 2. Por simplicidad se asume que el largo de los poros H es igual al espesor de la prueba. Los poros son abiertos y asequibles desde los dos extremos.

Con este modelo se puede calcular el área específica superficial inicial de la preforma, que está definida como la relación entre el área superficial interior de N poros cuadrados de espesor a_0 sobre el volumen total de la prueba.

$$S_{V,poro,0} = \frac{N \cdot 4 \cdot a_0 \cdot H}{V_{total}} \quad \text{Ecn. 4}$$

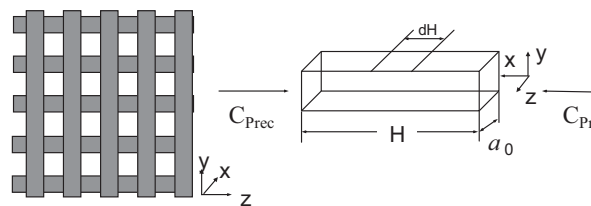


Figura 2: Modelo geométrico de la estructura de la preforma porosa

Considerando que el volumen total, V_{total} , está definido como la suma entre el volumen de las fibras más el volumen de espacio vacío inicial, $V_{poros,0}$, y definiendo la porosidad inicial, ϵ_0 , como la relación entre $V_{poros,0}$ y V_{total} (Ecn. 5) se puede calcular la expresión del área específica superficial inicial en términos de la porosidad inicial y las dimensiones iniciales de los poros (Ecn. 6).

$$\epsilon_0 = \frac{V_{poros,0}}{V_{total}} = \frac{N \cdot a_0^2 \cdot H}{V_{total}} \quad \text{Ecn. 5}$$

$$S_{V,poro,0} = 4 \cdot \frac{\epsilon_0}{a_0} \quad \text{Ecn. 6}$$

Sin embargo, esta expresión es solamente válida para la preforma a condiciones iniciales. Para conocer la variación del área específica superficial, $S_{V,poro}$, durante la deposición, se debe definir la función de la porosidad con respecto al área transversal variable de los poros, utilizando el cambio diferencial de la porosidad definida según Sheldon y Besmann [21] como se muestra en Ecn. 7, donde q es la probabilidad de que la capa sólida llene el poro y está definida como la porosidad momentánea sobre la inicial.

$$d\epsilon = q \cdot d\epsilon_f = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \cdot d\epsilon_f \quad \text{Ecn. 7}$$

La expresión de la porosidad final, ϵ_f , se obtiene de su definición análoga a Ecn. 5 y reemplazando la expresión de V_{total} obtenida al despejar Ecn. 4 y reemplazar la expresión de $S_{V,poro,0}$ de Ecn. 6.

$$\epsilon_f = \frac{V_{poros,f}}{V_{total}} = \frac{N \cdot a_f^2 \cdot H}{V_{total}} = \epsilon_0 \left(\frac{a}{a_0} \right)^2 \quad \text{Ecn. 8}$$

Reemplazando la expresión de la porosidad final en Ecn. 7 se obtiene la expresión en Ecn. 9. Esta ecuación se integra incluyendo las condiciones iniciales $a = a_0$ y $\epsilon = \epsilon_0$ para encontrar la expresión de la porosidad momentánea en términos de la altura del poro (Ecn. 10).

$$d\epsilon = \frac{\epsilon}{a_0} \cdot 2a \cdot da \quad \text{Ecn. 9}$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \exp \left[\left(\frac{a}{a_0} \right)^2 - 1 \right] \quad \text{Ecn. 10}$$

Para conocer el área específica superficial momentánea, $S_{V,poro}$, se asume una infiltración homogénea en todas las superficies y se realizan las siguientes operaciones matemáticas. La velocidad de cambio de la porosidad momentánea, $d\varepsilon/dt$, se obtiene diferenciando la expresión de la porosidad con respecto al tiempo, dt , (Ecn. 11) e igualando con la expresión de Ecn. 9 al dividirla por el tiempo diferencial (Ecn. 12). Con estas transformaciones y despejando Ecn. 10 para la altura momentánea, se tiene la expresión del área específica superficial en función de la porosidad instantánea (Ecn. 13)

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{Na^2H}{V_{total}} \right) = \frac{2NH a}{V_{total}} \frac{da}{dt} \quad \text{Ecn. 11}$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{S_{V,poro}}{2} \frac{da}{dt} = \frac{\varepsilon}{a_0} \cdot 2a \cdot \frac{da}{dt} \quad \text{Ecn. 12}$$

$$S_{V,poros} = \frac{4 \cdot \varepsilon}{a_0} \sqrt{\ln \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) + 1} \quad \text{Ecn. 13}$$

Determinación del Módulo de Thiele

Para un proceso de CVI isotérmico e isobárico el balance de masa en un poro característico en un segmento diferencial está dado por la siguiente expresión:

$$\frac{dn_A}{dt} = -D_A^{ef} a^2 \frac{dC_A}{dx} \Big|_x - \left(-D_A^{ef} a^2 \frac{dC_A}{dx} \Big|_{x+dx} \right) + R_A dV \quad \text{Ecn. 14}$$

donde n_A es el número de moles de precursor A que atraviesa el segmento analizado, D_A^{ef} es el coeficiente de difusión efectiva calculado a partir del coeficiente de difusión molecular y el coeficiente de difusión de Knudsen según Jakubith [22], y $R_A dV$ es el término cinético obtenido experimentalmente, donde R_A es la velocidad de consumo de A con respecto al volumen de reactor ($R_A = -r_s \cdot S_{V,poro}$) y dV es el volumen diferencial de reacción ($dV = a^2 dx$).

Para realizar los cálculos pertinentes se hicieron las siguientes simplificaciones:

- el sistema está en estado estacionario
- la difusión dentro de los poros transcurre de acuerdo a la 1. ley de Fick ($J_A = D_A^{ef} \cdot dC_A/dx$).
- difusión de película es despreciable
- la velocidad de la reacción catalítica se puede expresar con la expresión superficial que se obtuvo anteriormente
- se supone un sistema pseudo-homogéneo.

Con estas simplificaciones y reemplazando la concentración, C_A y la posición axial en el poro, x , por los números adimensionales $f = C_A/C_{A,0}$ y $Z = x/(H/2)$ al dividir por la concentración en la superficie exterior del poro y el largo de infiltración, se obtiene una expresión para el balance de masa para la concentración y posición adimensional.

$$0 = \frac{d^2 f}{dZ^2} - \frac{H^2}{4} \cdot \frac{k_s S_{V,poro} C_{A,0}^{n-1}}{D_A^{ef}} \cdot f^n \quad \text{Ecn. 15}$$

Esta expresión se puede simplificar al introducir el Módulo de Thiele, ϕ , que describe la relación entre la velocidad de la reacción química y la velocidad de la difusión en los poros y para poros de área transversal cuadrados está definida por la siguiente expresión, donde todos los valores son conocidos experimental- o matemáticamente:

$$\phi = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{k_s S_{V,poro} \cdot C_{A,0}^{n-1}}{D_A^{ef}}} \quad \text{Ecn. 16}$$

Con esta definición la expresión en Ecn. 15 se simplifica a la siguiente forma:

$$0 = \frac{d^2 f}{dZ^2} - \phi^2 \cdot f^n \quad \text{Ecn. 17}$$

Esta ecuación diferencial de segundo orden para un orden de reacción n diferente de uno no se puede solucionar matemáticamente. La expresión para la concentración adimensional, f , se obtuvo de la solución

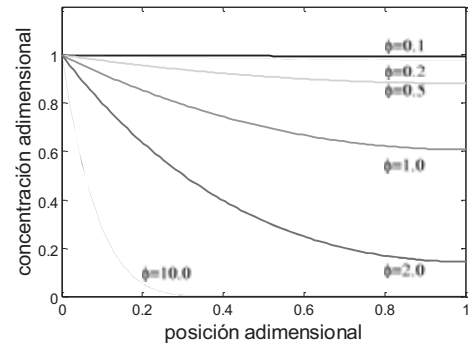


Figura 3: Solución gráfica de la ecuación diferencial del balance de masa en el poro

Determinación del factor de infiltración

El factor de infiltración o factor de eficacia, η , determina la relación entre la velocidad de reacción efectiva o real observada en el sustrato poroso y la velocidad de reacción superficial esperada de acuerdo a la cinética encontrada para reacciones superficiales no porosas ($\eta = r_{ef}/r_s$). Así al obtener el factor de infiltración de un proceso se conoce el grado de homogeneidad del proceso de deposición. Para poder calcular η es necesario conocer entonces las velocidades de reacción superficial y efectiva. La velocidad de reacción superficial, r_s , se puede calcular fácilmente utilizando la ecuación cinética obtenida anteriormente. Pero para obtener la velocidad de reacción efectiva, r_{ef} , es necesario integrar la expresión de la reacción instantánea en cada posición del poro.

$$r_{ef} = \frac{1}{H/2} \int_0^{H/2} r(x) dx = \frac{1}{H/2} \int_0^{H/2} k_s \cdot C_A^n dx \quad \text{Ecn. 18}$$

Por lo tanto, el factor de infiltración está dado por la siguiente expresión, después de introducir la concentración y la posición adimensional

$$\eta = \int_0^1 f^n dZ \quad \text{Ecn. 19}$$

La expresión para la concentración adimensional, f , se obtiene de la solución numérica como se puede observar en el Figura 3. El siguiente paso es por lo tanto, obtener el área debajo la curva de f vs. Z , para el orden de reacción determinado anteriormente y el Módulo de Thiele calculado a partir de los datos disponibles y específico para cada caso. El área bajo la curva es el valor del factor de infiltración para la reacción de deposición en los substratos estudiados.

En la Tabla 4 se encuentran los datos independientes del sistema utilizados para el cálculo de Módulo de Thiele. El coeficiente de difusión efectiva se obtiene a partir de las ecuaciones del coeficiente de difusión molecular según Hirschfelder y el coeficiente de difusión de Knudsen. La porosidad inicial y final se obtienen a través de mediciones de porosimetría de mercurio (Carlo Erba Mercury Intrusion Porosimetry 2000). La altura y el largo de los poros obtienen al mediar los resultados de pruebas con SEM. Finalmente la tortuosidad se obtiene matemáticamente en función de la porosidad [1].

Espesor de la prueba, H [cm]	0,2
Tortuosidad, τ [-]	1,23
Altura de los poros iniciales, a_0 [μm]	11,8
Porosidad inicial, ϕ_0 [-]	0,9
Porosidad final, $\phi_{0,6}$ [-]	0,6
Área superficial específica inicial, $S_{V, \text{poro}, 0}$ [1/cm]	3,05E+03
Área superficial específica final $S_{V, \text{poro}, 0,6}$ [1/cm]	2,35E+03

Tabla 3: Propiedades de la preforma para el cálculo de ϕ

En las siguientes tablas se muestran los valores numéricos de los diferentes parámetros para los sistemas MTS / H_2 y SiCl_4 / H_2 . Con estos valores fue posible calcular el Módulo de Thiele para la preforma inicial y para la preforma final conociendo que inicialmente la porosidad de la preforma es de 0,9, mientras que la porosidad final observada llegaba hasta a 0,6.

Sistema	MTS / H_2	
	mínimo	máximo
Temperatura de la infiltración [$^{\circ}\text{C}$]	850	950
Fraciones molares iniciales de precursor 1 [-]	0,01	0,1
Coeficiente de difusión molecular, D_m [cm^2/s]	4,35 – 5,02	5,02
Coeficiente de difusión de Knudsen, D_k [cm^2/s]	1,57E+03	1,64E+03
Coeficiente de difusión efectivo, D_A^{ef} [cm^2/s]	3,16	3,65
Concentración superficial, $C_{A,0}$ [mol/ cm^3]	0,17	1,00
coeficiente cinético, k_s [mol/s (mol/ cm^3) $^{1-n}$]	2,66E-04	1,22E-03
Módulo de Thiele con porosidad inicial η_0, ϕ_0 [-]	0,072	0,101
Módulo de Thiele con porosidad final $\eta_{0,6}, \phi_{0,6}$ [-]	0,063	0,089

Tabla 4: Cálculo del Módulo de Thiele para el sistema MTS / H_2

Los valores numéricos del Módulo de Thiele se encuentran entre 0,063 y 0,1 para el sistema de MTS / H_2 y entre 0,033 y 0,038 para el sistema de SiCl_4/H_2 , aumentando en ambos casos con la temperatura y la concentración de precursor. En el Figura 4 se observa el transcurso de la concentración adimensional esperada a lo largo del poro para los dos sistemas: MTS/ H_2 y SiCl_4/H_2 , al utilizar los valores del Módulo de Thiele calculados.

Sistema	SiCl_4 / H_2	
	mínimo	máximo
Temperatura de la infiltración [$^{\circ}\text{C}$]	850	900
Fraciones molares iniciales de precursor 1 [-]	0,01	0,08
Coeficiente de difusión molecular, D_m [cm^2/s]	4,39	4,72
Coeficiente de difusión de Knudsen, D_k [cm^2/s]	1,47E+03	1,50E+03
Coeficiente de difusión efectivo, D_A^{ef} [cm^2/s]	3,19	3,43
Concentración superficial, $C_{A,0}$ [mol/ cm^3]	0,11	0,97
coeficiente cinético, k_s [mol/s (mol/ cm^3) $^{1-n}$]	6,83E-05	1,63E-04
Módulo de Thiele con porosidad inicial η_0, ϕ_0 [-]	0,038	0,038
Módulo de Thiele con porosidad final $\eta_{0,6}, \phi_{0,6}$ [-]	0,033	0,034

Tabla 5: Cálculo del Módulo de Thiele para el sistema SiCl_4 / H_2

Una vez obtenidas las curvas de la concentración adimensional para cada sistema, es posible obtener el factor de infiltración esperado al calcular el área bajo la curva entre 0 y 1 de las curvas de la concentración adimensional a la potencia del orden de reacción obtenido en el análisis cinético (Ecn. 9). Para los sistemas estudiados y bajo las condiciones dadas se obtuvieron valores del factor de infiltración de más del 99,8% para el sistema MTS/ H_2 y de más del 99,9% para el sistema SiCl_4/H_2 .

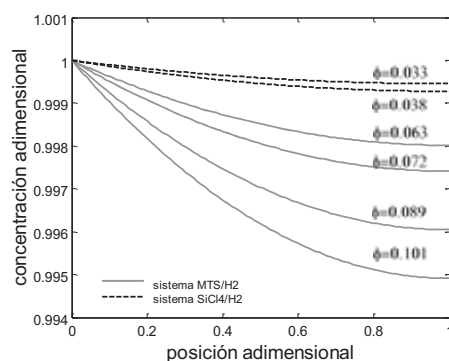


Figura 4: Transcurso de la concentración adimensional a lo largo del poro para los valores de ϕ obtenidos matemáticamente

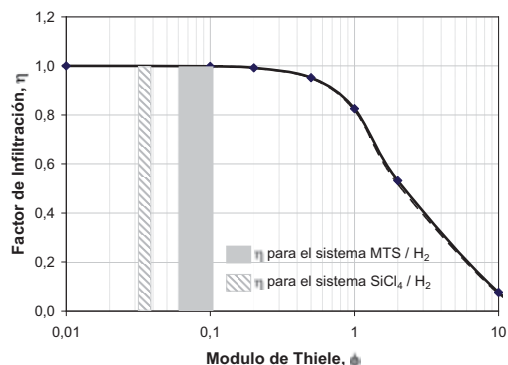


Figura 5: Transcurso del factor de infiltración para diferentes valores del Módulo de Thiele para los dos sistemas

Esto también se puede ver claramente en el Figura 5 donde se muestra el transcurso del factor de infiltración esperado para diferentes valores del Módulo de Thiele. Dado que el orden de la reacción en los dos sistemas es muy parecido, las curvas de dependencia del factor de infiltración con el Módulo de Thiele son prácticamente idénticas. Para finalizar se calcula el espesor de la prueba máximo, o largo máximo de los poros, que se puede infiltrar homogéneamente bajo las mismas condiciones. De la gráfica y de los resultados matemáticos es posible identificar que a partir de valores del Módulo de Thiele mayores a 0,5, el valor del factor de infiltración es menor al 95%. Este valor se alcanza con pruebas de 1 cm

de espesor. Por lo tanto, se espera que se pueda infiltrar pruebas de espesor menor a 1cm homogéneamente.

c) Caracterización de las cerámicas obtenidas

Con valores tan cercanos al 100% se concluye que la infiltración a lo largo de los poros es completamente homogénea. Esto se lo puede comprobar al analizar la estructura microscópica de las pruebas infiltradas.

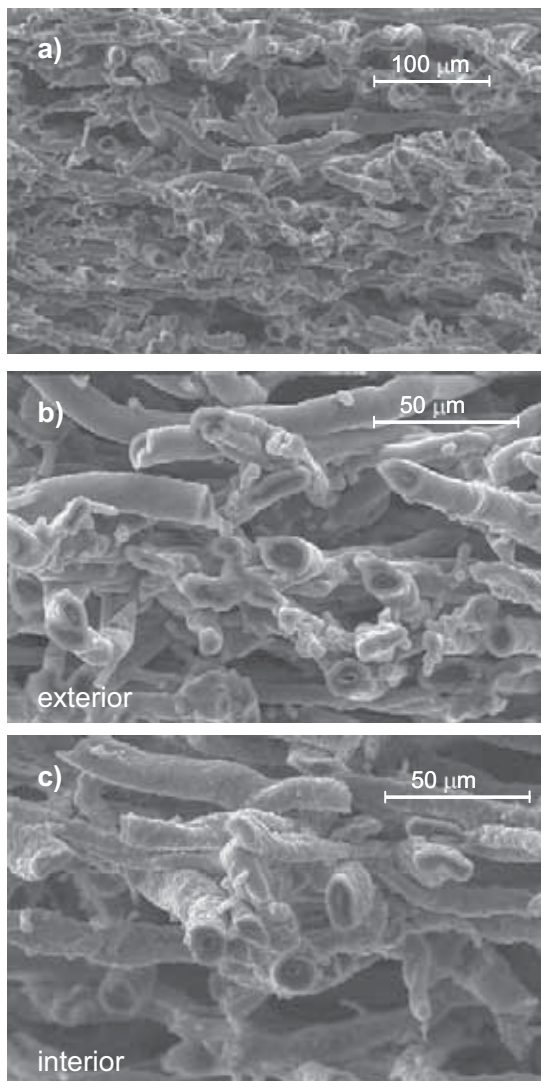


Figura 6: Micrografías con SEM de las cerámicas biomórficas de Si/SiC obtenidas con el sistema MTS/H₂. a) vista amplia, b) extremo exterior, c) centro de la prueba

Los diagramas de SEM muestran que las capas depositadas son completamente homogéneas como se puede ver en el Figura 6 para el sistema MTS/H₂. Sin embargo, a pesar de que el espesor de las capas depositadas en el exterior es igual al de las depositadas en el centro de la prueba, se puede identificar una diferencia en la morfología de las pruebas. Esta diferencia se la debe a que en el centro la concentración de productos gaseosos (HCl) es más alta, lo que ocasiona una morfología más irregular. El espesor de las capas depositadas varía entre 2 y 3 µm tanto para capas en el exterior como en el interior de las pruebas.

En el Figura 7 se muestra la estructura microscópica de una prueba obtenida con el sistema SiCl₄/H₂. Se puede observar que la morfología de este depósito más bien cristalino y no tan liso. Esto se debe a las mayores temperaturas de deposición utilizadas con este sistema. Sin embargo, esto no afecta a que las capas depositadas sean homogéneas en toda la prueba variando entre 3 y 4 µm de espesor.

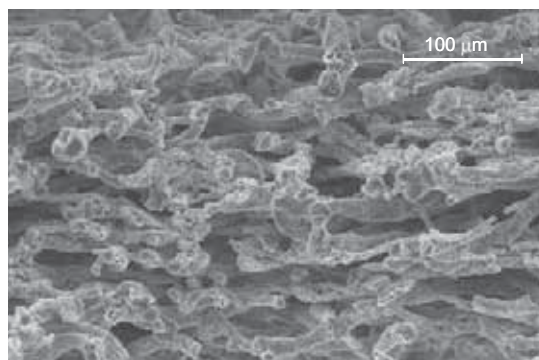


Figura 7: Micrografías con SEM de las cerámicas biomórficas de Si-C obtenidas con el sistema SiCl₄/H₂

Conclusiones

En este trabajo se ha logrado establecer un modelo matemático para predecir la homogeneidad en la infiltración y deposición de cerámicas biomórficas en preformas de carbono. Este modelo matemático establecido a partir del balance de masa en un poro se basa en la cinética obtenida previamente en estructuras no porosas y en el modelo matemático que se definió para la geometría de preforma. Con el modelo se predijo que las preformas planas de hasta 1mm de espesor pueden ser infiltradas con los dos sistemas MTS/H₂ y SiCl₄/H₂ con una homogeneidad de más de 99%, lo cual fue demostrado con micrografías de SEM donde se comparó el espesor y la morfología de las capas depositadas en estructuras infiltradas.

Agradecimientos

La autora agradece al Departamento de Ingeniería de las Reacciones Químicas de la Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg por el trabajo realizado en conjunto y al Ministerio de Educación e Investigación (BmBF) por la financiación consagrada.

Referencias bibliográficas

1. Almeida S., D. 2004. Kinetic Investigation of the Chemical Vapor Infiltration and Reaction (CVI-R) process for the Production of SiC and TiC Biomorphic Ceramics from Paper Preforms; Dissertation, University of Erlangen – Nuremberg.
2. de Jong, F.; Meyyappan, M. 1996. "Numerical simulation of silicon carbide chemical vapor deposition"; Diamond and Related Materials; Vol. 5 (2); 1996; pp. 141 – 150.

3. Pritzlaff, D.; Lautner, V. 1997. *CVD – Beschichtungstechnik*; 1. Auflage; Eugen G. Leuzer; Verlag; Saulgau; Germany.
4. Ahmad, Z.; Mark, J.E. 1998. “Biomimetic materials: recent developments in organic – inorganic hybrids”; *Materials Science and Engineering C*; Vol. 6; pp. 183 – 196.
5. Zhou, B. 1993. “Biomemitec Design and Test of Composite Materials”; *J. of Materials Science Technology*; Vol. 9; pp. 9 – 19.
6. Greil, P.; Vogli, E.; Fey, T.; Bezold A.; Popovska, N.; Gerhard, H.; Sieber, H. 2002. “Effect of Microstructure on the fracture of biomorphous silicon carbide ceramics”; *J. of the European Ceramic Society*; Vol. 22; pp. 2697 – 2707.
7. Greil, P.; Lifka, T.; Kaindl, A. 1998. “Biomorphic Cellular Silicon Carbide Ceramics from Wood: II. Mechanical Properties”; *J. of the European Ceramic Society*; Vol. 18; pp. 1975 – 1983.
8. Sieber, H.; Hoffmann, C.; Kaindl, A.; Greil, P. 2000. “Biomorphic Cellular Ceramics”; *Advances Engineering Materials*; Vol. 2 (3); pp. 105 – 109.
9. Varela-Feria, F. M.; López-Robledo, M. J.; Martínez-Fernández, J.; Arellano-López, A. R. 2002. “Precursor Selection for Property Optimization in Biomorphic SiC Ceramics”; *Ceramic Engineering and Science Proc.*; Vol. 23 (4); pp. 681 – 687.
10. Varela-Feria, F. M.; De Arellano-Lobredo, A. R.; Martínez-Fernández, J. 2002. “Fabricación y Propiedades del Carburo de Silicio Biomórfico: Maderas Cerámicas”; *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*; Vol. 41; pp. 377 – 384.
11. Sieber, H.; Vogli, E.; Greil, P.. 2001. “Biomorphic SiC – Ceramic Manufactured by Gas Phase Infiltration of Pine Wood”; *Ceramic Engineering and Science Proceedings*; 22 (4, 25th Annual Conference on Composites, Advanced Ceramics, Materials, and Structures: B, 2001); pp. 109 – 116.
12. Vogli, E.; Sieber, H.; Greil, P. 2002. “Biomorphic SiC – ceramics prepared by Si – vapor phase infiltration of wood”; *J. of the European Ceramic Society*; Vol. 22; pp. 2663 - 2668
13. Greil, P.; Vogli, E.; Fey, T.; Bezold A.; Popovska, N.; Gerhard, H.; Sieber, H. 2002. “Effect of Microstructure on the fracture of biomorphous silicon carbide ceramics”; *J. of the European Ceramic Society*; Vol. 22; pp. 2697 – 2707.
14. Almeida Streitwieser, D., Popovska N., Gerhard, H., Emig, G. 2004. “ Application of the Chemical Vapor Infiltration and Reaction (CVI-R) Technique for the Preparation of high Porous Biomorphic SiC Ceramics Derived from Paper” ; *J. of the European Ceramic Society*; Vol. 25(6); pp 817-828.
15. Ohzawa, Y.; Hoshino, H.; Fujikama, M.; Nakane, K.; Sugiyama, K. 1998. “Preparation of high temperature filter by pressure – pulsed chemical vapor infiltration of SiC into carbonized paper – fibre pre-forms”; *J. of Materials Science*; Vol. 33; pp. 5259 – 5264.
16. Popovska, N., Almeida Streitwieser, D., Gerhard, H., Emig, G. 2003. “Kinetic Analysis of the Low Temperature CVD of Silicon / Silicon Carbide from Methyltrichlorosilane / Hydrogen for the Ceramization of Biomorphic Carbon Preforms”; in *Proceedings of the Int. Symp. Chemical Vapor Deposition XVI and EUROCVD 14*; Vol. 1; pp. 573 – 580.
17. Popovska, N.; Almeida-Streitwieser, D.; Xu, C.; Gerhard, H.; Sieber, H. 2005. “Kinetic Analysis of the Processing of Porous Biomorphic Titanium Carbide Ceramics by Chemical Vapor Infiltration”; *Chemical Vapor Deposition*; Vol. 11 (3), pp 153 – 158.
18. Almeida Streitwieser, D., Popovska, N.; Gerhard, H., Emig, G. 2004. “Processing of Biomorphous SiC Ceramics from Paper Preforms by Chemical Vapor Infiltration and Reaction(CVI-R) Technique”; *Ceramic Engineering and Science Proceedings*; 25 (4, 28th; Chapter 7: References 228; International Cocoa Beach Conference on Advanced Ceramics and Composites, 2004,Symposium 3)
19. Choy, K.L. 2003. “Chemical vapour deposition of coatings; *Progress in Materials Science*; Vol. 48; pp. 57 – 170.
20. Pierson, H. O. 1999. *Handbook of Chemical Vapor Deposition (CVD): Principles, Technology and Applications*; 2nd edition; Noyes Publications; William Andrew Publishing, LLC, USA.
21. Sheldon, B.W.; Besmann, T.M. 1991. “Reaction and Diffusion Kinetics During the initial Stages of Isothermal Chemical Vapor Infiltration”; *Journal of American Ceramic Society*; Vol. 74 (12); pp. 3046 – 3053.
22. Jakubith, M. 1992. *Chemie und Chemietechnik, Memofix*; VCH Verlagsgesellschaft; Weinheim – Germany.

ANCLAJE DE PAREDES DE DOMINIO DE INTERFACES FERROMAGNETO/ANTIFERROMAGNETO EN LA MANGANITA $\text{Pr}_{0.5}\text{Sr}_{0.5-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ CON SEPARACIÓN DE FASES

Darío G. Niebieskikwiat,^{*1,2,3} Rodolfo D. Sánchez^{2,3}

¹ Colegio de Ciencias e Ingeniería, USFQ.

² Instituto Balseiro-Centro Atómico Bariloche, Comisión Nacional de Energía Atómica, S.C. de Bariloche, Argentina.

³ Miembro del CONICET, Argentina.

Resumen

Aquí presentamos un estudio de las propiedades magnéticas de la manganita $\text{Pr}_{0.5}\text{Sr}_{0.5-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ para $x=0.1$ y 0.2 , donde se presenta la coexistencia entre las fases ferromagnética (FM) y antiferromagnética (AFM). Este estado está caracterizado por la presencia de inclusiones FM dentro de una matriz AFM. La evolución de la magnetización (M) con el campo magnético aplicado (H) muestra la existencia de un campo crítico H_C , por encima del cual M crece rápidamente, indicando una expansión repentina del volumen de la fase FM en detrimento del volumen de la fase AFM. Analizamos este comportamiento y la respuesta de la susceptibilidad magnética a bajos campos ($H < H_C$) en términos de un modelo simplificado que considera el anclaje de las paredes de dominio FM/AFM (las interfaces entre las fases FM y AFM). A partir de este análisis podemos estimar algunos parámetros relevantes, incluyendo la energía y longitud característica de anclaje y el tamaño característico de los dominios ferromagnéticos, el cual coincide con otras observaciones experimentales.

Palabras Clave: manganitas, magnetización, dominios, coexistencia de fases, anclaje

Introducción

El descubrimiento de la “Magnetorresistencia Colosal” (CMR, por sus siglas en inglés “Colossal Magnetoresistance”) en las perovskitas de manganeso ha impulsado una gran actividad científica en el área de los óxidos magnéticos en los últimos años [1-6].

Recientemente, la separación de fases (SF) ha sido propuesta como el mecanismo subyacente que gobierna el comportamiento de la CMR en manganitas de valencia mixta [7,8]. Esto ha dado lugar a una importante cantidad de trabajos de investigación focalizados en este tema, y especialmente en la coexistencia de las fases ferromagnética metálica (FM) y la antiferromagnética con orden de carga (CO-AFM) [6]. En los años ‘50, Wollan y Koehler ya habían sugerido la existencia de la SF en el compuesto $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ [9]. Hoy en día, el acceso a nuevas técnicas experimentales ha permitido la observación directa de la coexistencia de fases, ya sea mediante microscopía túnel de barrido [7], microscopía electrónica [8,10], NMR [11,12], dispersión de neutrones [13-15], o aún mediante mediciones magnéticas y de transporte [16-19].

Más allá de todos los esfuerzos orientados a comprender la CMR en las manganitas, aún no hay un panorama concluyente que explique el fenómeno de la separación de fases. Algunos autores han propuesto que una segregación espacial espontánea de los portadores de carga podría ser responsable de la SF observada [6,20-22]. Parece factible que este tipo de separación de fases ocurra en compuestos levemente dopados, donde una SF del tipo polarónica fue observada a escala nanométrica [15]. En materiales fuertemente dopados, en

cambio, la presencia de *clusters* (dominios) de decenas o centenas de nanómetros [7,8,10] indica que es poco probable una segregación espontánea de carga. Por otro lado, ha sido demostrado que el desorden al azar (o *random*) puede explicar la separación de fases a escala sub-micrométrica [18,23,24]. Uno de los candidatos propuestos como promotor de desorden es el *mismatch* del sitio A de la manganita, σ_A^2 [6,24]. Los diferentes radios iónicos de los cationes que ocupan el sitio A de la estructura perovskita inducen distorsiones locales de la red cristalina, afectando el balance energético de las fases que compiten y abriendo la posibilidad de la coexistencia de fases [25,26].

Finalmente es necesario mencionar que las fases FM y CO-AFM presentan diferencias importantes en sus estructuras cristalinas. Esto hace que en los alrededores de las interfaces FM/AFM (las paredes de dominio), se generen importantes tensiones y deformaciones estructurales. Así, las transiciones de fase $\text{FM} \leftrightarrow \text{AFM}$, las cuales proceden *via* el desplazamiento de estas paredes de dominio, podrían tener características martensíticas, donde el traslado de las paredes de dominio implicaría también pequeños desplazamientos atómicos. Esto significa que las paredes de dominio deberían “arrastrar” las deformaciones estructurales en su movimiento, lo que probablemente se vea impedido por las barreras de energía impuestas por las mismas tensiones cristalinas. Así, las paredes de dominio se verían *auto-atrapadas* (*self-trapping*) por las tensiones que ellas mismas generan, permitiendo la presencia de ambas fases (separación de fases) tal como muestran algunas simulaciones numéricas [27] y experimentos de magnetización a bajas temperaturas [28].

En manganitas con SF, debido a la ganancia de la energía Zeeman la aplicación de un campo magnético (H) produce la expansión de los dominios FM a expensas de reducir el volumen de la fase AFM [7,18]. Consecuentemente se favorece el transporte electrónico percolativo y la resistividad se reduce fuertemente, produciendo la CMR [29,30]. En este contexto, el anclaje de las paredes de dominio que separan las fases en coexistencia podría también jugar un papel relevante en la dinámica de los dominios FM. Desde este punto de vista, resulta importante estudiar la evolución de los *clusters* magnéticos bajo la aplicación de un campo externo.

En este trabajo enfocamos nuestra atención en las propiedades magnéticas del compuesto $\text{Pr}_{0.5}\text{Sr}_{0.5-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ para $x=0.1$ y 0.2 . Para temperaturas T por debajo de $\sim 200\text{K}$ estas muestras presentan la coexistencia de las fases FM y CO-AFM. En este rango de temperaturas, los ciclos M vs H exhiben dos regímenes diferentes de campo magnético. A bajos campos observamos una respuesta térmicamente activada con una dinámica lenta de los dominios FM, mientras que para H por encima de un campo crítico H_C ocurre un crecimiento rápido e irreversible del volumen FM. En este trabajo discutimos este comportamiento en términos del anclaje de las paredes de dominio y su posible relación con el *self-trapping* inducido por tensiones y el desorden catiónico del sitio A .

Mediciones magnéticas

Las muestras de $\text{Pr}_{0.5}\text{Sr}_{0.5-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ ($x=0.1$ y 0.2) fueron preparadas mediante el método de descomposición de nitratos, como se describió en un trabajo anterior [25].

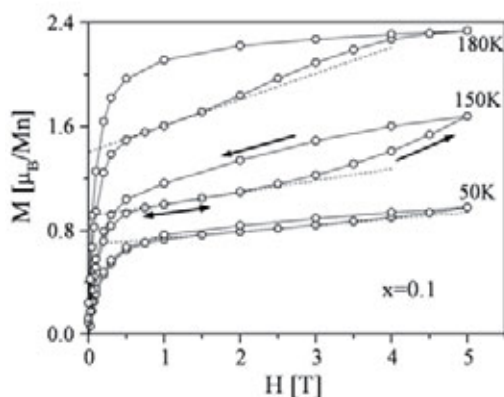


Figura 1. Curvas M vs H a diferentes temperaturas para la muestra $x=0.1$. Las líneas punteadas muestran el régimen lineal de la magnetización. Las flechas en la curva a 150K indican las regiones reversible e irreversible por debajo y por encima del campo crítico H_C , respectivamente (ver texto).

Los datos de magnetización (M) fueron obtenidos con un magnetómetro tipo SQUID de *Quantum Design* equipado con un imán de 5T, y para temperaturas de entre 5 y 300K. Los resultados de M vs H para $x=0.1$ a tres temperaturas representativas se muestran en la Fig. 1 (los resultados para $x=0.2$ son cualitativamente similares, Ref. 18). Estas temperaturas (50, 150 y 180K) corresponden al intervalo donde se observa la coexistencia de las fases FM y CO-AFM [18]. En esta figura observamos que una vez que el sistema es magnetizado ($H > 0.5\text{T}$), a campos bajos se obtiene un comportamiento lineal. Las líneas rectas punteadas son ajustes de este régimen lineal. De la pendiente de estas líneas obtuvimos la susceptibilidad χ , y de la extrapolación hacia campo cero (la ordenada al origen) obtuvimos la magnetización espontánea M_0 , la cual es proporcional a la fracción de volumen de fase FM para $H=0$ ($\sim 20\%$ a bajas temperaturas, Ref. 18). Es muy remarcable que, mientras el campo aplicado sea ciclado por debajo de un campo crítico H_C , los ciclos $M(H)$ permanecen totalmente reversibles, tal como indica la doble flecha para la curva a 150K. Sin embargo, cuando el campo aplicado excede a H_C la magnetización se aparta del comportamiento lineal, y al disminuirse nuevamente el campo aplicado se genera una gran irreversibilidad (histéresis). Este comportamiento es similar al observado en otras manganitas, donde a bajas

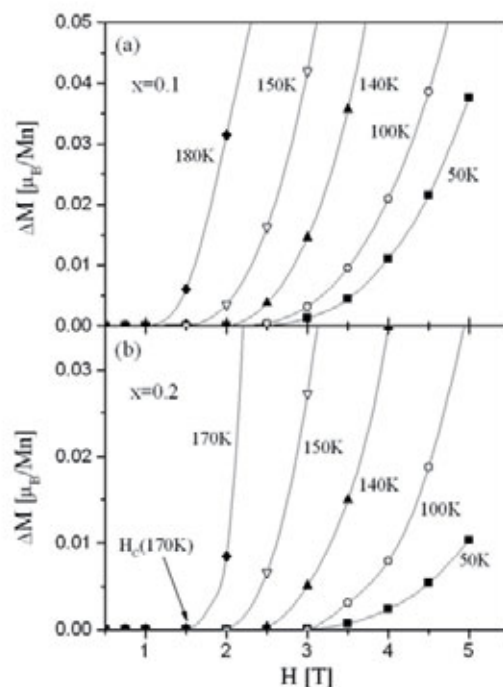


Figura 2. Dependencia con campo magnético de la diferencia ΔM entre la magnetización medida y los ajustes lineales obtenidos debajo del campo crítico H_C (ver Fig. 1). a) muestra $x=0.1$ y b) $x=0.2$. Cada curva corresponde a una temperatura diferente, como se indica.

temperaturas tienen lugar abruptas transiciones metamagnéticas con características martensíticas [28]. Vale la pena mencionar que para $T > 200\text{K}$, donde las muestras son ferromagnéticas casi por completo, las curvas $M(H)$ son totalmente reversibles sin importar el campo magnético al que sean sometidas [18]. Para ilustrar claramente este comportamiento dentro del estado de separación de fases, en la Fig. 2 mostramos la diferencia ΔM entre la magnetización medida y aquella calculada con los ajustes lineales de la Fig. 1. El rápido apartamiento de M de la linealidad es ahora evidenciado por el crecimiento de ΔM para $H > H_C$. A partir de estas curvas identificamos el campo crítico a cada temperatura, como se ejemplifica en la Fig. 2(b) para la muestra $x=0.2$ a $T=170\text{K}$. En la Fig. 3 presentamos un diagrama de fases T - H para cada una de las muestras [18], donde a bajas temperaturas se observa la coexistencia AFM+FM. Dentro de este estado de separación de fases, el campo crítico como función de T , $H_C(T)$, es representado por los triángulos sólidos.

Anclaje de paredes de dominio: modelo y discusión

Los resultados arriba descriptos sugieren fuertemente que H_C es el campo necesario para superar una fuerza de anclaje que se opone a la expansión de los

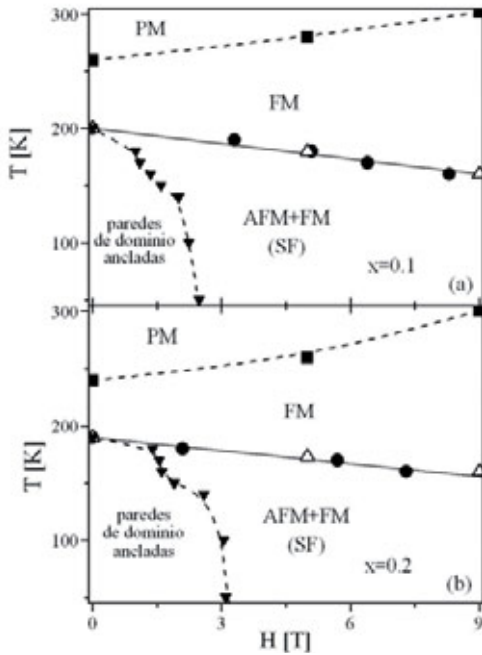


Figura 3. Diagrama de fases T - H mostrando los diferentes estados magnéticos de las muestras, a) $x=0.1$ y b) $x=0.2$. Dentro del estado de separación de fases (SF) a bajas temperaturas, los triángulos sólidos indican el campo crítico H_C , interpretado como el campo de desanclaje de las paredes de dominio que separan los *clusters* FM de los AFM.

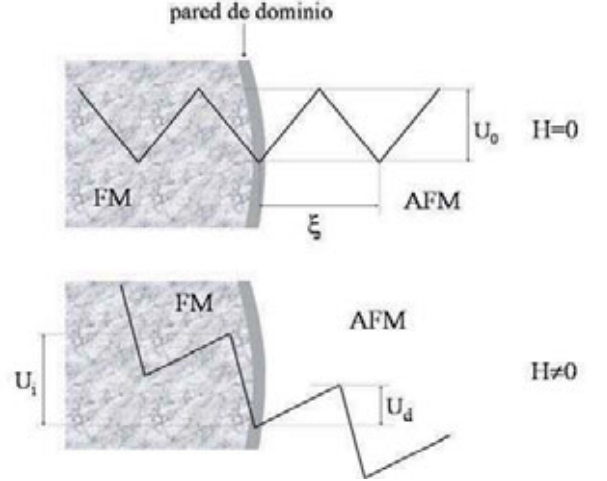


Figura 4. Esquema de potencial tipo “tabla de lavar” utilizado para describir la dinámica de las paredes de dominio. a) caso para $H=0$, b) caso para $H \neq 0$.

clusters FM. Como se indica en la Fig. 3, asumimos que las paredes de dominio que separan las regiones FM de la matriz AFM están atrapadas en algún centro de anclaje, ya sea generado por desorden intrínseco (σ_A^2) o por el desorden estructural generado en torno a las paredes interfaciales (*self-trapping*). Cuando el campo magnético es suficientemente alto, la presión magnética empuja a las paredes de dominio fuera de estos centros de anclaje y el volumen FM crece repentinamente, produciendo también un aumento de magnetización. Para $H < H_C$, las propiedades reversibles de la magnetización estarían relacionadas con una dinámica muy lenta de las paredes de dominio en un medio desordenado. De manera muy básica, esta situación se puede describir mediante el esquema equivalente de una partícula atrapada en un pozo de energía. Como indica la Fig. 4, un modelo fenomenológico simplificado para describir un medio desordenado es el potencial tipo “tabla de lavar”. En este marco, los centros de anclaje están caracterizados por una energía típica U_0 y un tamaño ξ . Por supuesto que este modelo es una descripción simplificada del problema, pero es útil para entender la dinámica básica de los *clusters* FM en manganitas con separación de fases.

Para $H=0$ cada pared de dominio está localizada en un mínimo de energía (un centro de anclaje) y tiene igual probabilidad de hacer un salto térmicamente activado en cualquiera de las dos direcciones (izquierda o derecha en la Fig. 4). En consecuencia, el valor medio del desplazamiento de las paredes de dominio es $\langle s \rangle = 0$. Por el contrario, cuando se aplica un campo magnético las barreras de energía a izquierda y derecha de la pared de dominio (U_i y U_d respectivamente) se desbalancean en una magnitud proporcional a H , por lo que escribimos $U_i = U_0 + \beta H$ y $U_d = U_0 - \beta H$, con β una constante. Este

desbalanceo se refleja en un movimiento efectivo de las paredes de dominio hacia la derecha, es decir que ocurre un crecimiento del *cluster* FM. En esta situación, el desplazamiento medio de las paredes de dominio puede escribirse como

$$\langle s \rangle \sim \xi (P_d - P_i) \propto e^{-U_d/kT} - e^{-U_i/kT} \quad (1)$$

donde P_d y P_i son las probabilidades de que la pared de dominio haga un salto a un centro de anclaje vecino a distancia ξ a la derecha e izquierda respectivamente. Es claro que la Ec. (1) corresponde a una aproximación de primer orden, donde hemos despreciado aquellos saltos que involucran distancias de 2ξ o mayores. Esta relación es válida para campos bajos ($H < H_C$), de manera que $\langle s \rangle$ se mantenga pequeño. En este caso, la Ec. (1) puede expresarse como

$$\langle s \rangle \sim e^{-U_0/kT} H \quad (2)$$

Por lo tanto, el crecimiento de volumen de los *clusters* FM inducido por el campo magnético se obtiene como

$$\delta V \propto D^2 \langle s \rangle \sim e^{-U_0/kT} H \quad (3)$$

donde D es el tamaño característico de los dominios FM. Por un lado, ya que el crecimiento de la magnetización es proporcional a δV , la Ec. (3) muestra que M debería seguir un comportamiento lineal con el campo aplicado, como de hecho observamos en las curvas $M(H)$ de la Fig. 1 para $H < H_C$. Pero más importante, también indica que en este régimen lineal la susceptibilidad magnética debe seguir la ley de Arrhenius, donde la energía de activación está dada por U_0 , la energía de anclaje. Esta relación es bien confirmada por nuestros datos experimentales de $\chi(T)$, los cuales son graficados en la Fig. 5 para las dos muestras estudiadas. Las líneas mostradas junto con los datos experimentales (círculos sólidos y huecos) corresponden a los ajustes con la ley exponencial, de los cuales obtuvimos $U_0 \approx 100$ meV y 90 meV para $x=0.1$ y 0.2 respectivamente.

Avanzando aún más en el análisis del anclaje de las paredes de dominio, podemos ahora asumir que H_C es aproximadamente el campo necesario para superar la fuerza de anclaje F_A . Por lo tanto,

$$F_A \sim \frac{U_0}{\xi/2} \sim m_{FM} H_C \xi^2 \quad (4)$$

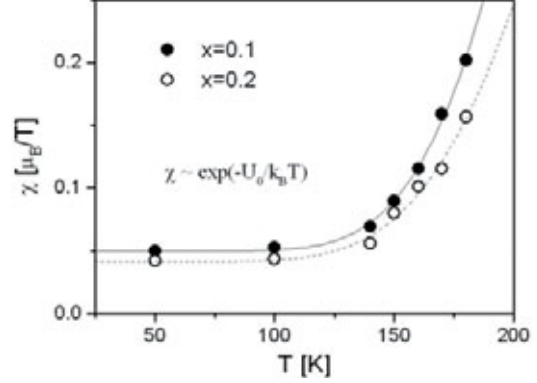


Figura 5. Dependencia en temperatura de la susceptibilidad magnética ($\chi = \partial M / \partial H$) obtenida de la región lineal de los datos $M(H)$ de la Fig. 1. Las líneas corresponden a los ajustes con la ley de Arrhenius indicada, donde U_0 es la energía característica de anclaje de las paredes de dominio FM/AFM.

donde m_{FM} es la magnetización por unidad de volumen de la fase FM, y el producto $m_{FM} H_C$ es la presión magnética. Ya que nuestro análisis está siendo realizado a temperaturas bastante por debajo de la temperatura de Curie del material ($T_C \sim 250$ K, ver Fig. 3), podemos simplificar el problema usando la aproximación $m_{FM} \sim M_S / a_0^3$, donde $M_S = 3.5 \mu_B$ es la magnetización de saturación por átomo de Mn para una manganita de dopaje 1/2 (como nuestro caso), y a_0 es la distancia promedio entre iones de Mn ($a_0 = 0.384$ nm) [25]. Reemplazando estos parámetros en la Ec. (4), se puede obtener el tamaño característico de los centros de anclaje,

$$\xi \sim \left(\frac{2U_0}{M_S H_C} \right)^{1/3} a_0 \quad (5)$$

De esta ecuación podemos entonces estimar $\xi \sim 7a_0 \sim 2.7$ nm. Este pequeño valor de ξ , apenas unas pocas distancias interatómicas, indica que el desorden que produce el anclaje de las paredes de dominio tiene un carácter local.

Dentro del marco propuesto en este trabajo, la escala de longitud característica para el movimiento de paredes de dominio está dada por ξ . Es por lo tanto esperable que el desplazamiento de las paredes de dominio para H apenas por debajo de H_C sea del orden de ξ , tal que cuando las paredes de dominio son capaces de moverse al sitio de anclaje vecino la probabilidad de moverse hacia atrás es despreciable ($P_i \ll P_d$) y entonces ocurre el desanclaje. De esta manera, es razonable asumir que el desplazamiento medio de las paredes de dominio es

$$\langle s \rangle \Big|_{H \rightarrow H_C^-} \sim \xi \quad (6)$$

Por lo tanto, en esta imagen el desanclaje de las paredes de dominio ocurre una vez que estas se desplazan una distancia ξ ($\sim 2.7\text{nm}$) desde su posición original hasta el sitio de anclaje vecino. En este punto vale la pena mencionar que las estimaciones aquí hechas no tendrían sentido si el ancho de las paredes de dominio fuera mucho mayor que ξ . Respecto de esto, experimentos de microscopía túnel hechos en manganitas de Bi-Ca [32] muestran que las paredes de dominio que separan las regiones FM de las CO-AFM pueden ser muy abruptas, tan pequeñas como una o dos distancias interatómicas.

Finalmente, hay un parámetro más que podemos estimar a partir de nuestro análisis, *i.e.* el tamaño de los *clusters* FM, D . Ya que la magnetización espontánea (M_0) es proporcional al volumen FM, podemos escribir $\delta M_C/M_0 = 3\delta D_C/D$, donde δD_C es el crecimiento del tamaño de los *clusters* FM cuando el campo aplicado alcanza H_C , y $\delta M_C = \chi H_C$. Combinando estas ecuaciones podemos finalmente llegar a una útil relación;

$$\chi = \left(\frac{3M_0}{H_C} \right) \frac{\delta D_C}{D} \quad (7)$$

La consecuencia más importante de esta ecuación es que provee una relación directa entre tres parámetros accesibles experimentalmente, que son χ , M_0 y H_C . Siguiendo la Ec. (7), construimos los gráficos de χ como función del parámetro $3M_0/H_C$ para ambas muestras, como se muestra en la Fig. 6 (cada punto de estos gráficos corresponde a una temperatura diferente en la región con SF, Fig. 3). Estos datos muestran una relación lineal bastante aceptable, con pendientes $\delta D_C/D = 0.047$ y 0.038 para las muestras $x=0.1$ y 0.2 respectivamente (una pequeña ordenada al origen $\chi \neq 0$ para $3M_0/H_C \rightarrow 0$ corresponde a la susceptibilidad de la matriz AFM). Los valores obtenidos indican que, antes de que las paredes de dominio sean desancladas en $H=H_C$, mediante un movimiento térmicamente activado el tamaño característico de los *clusters* FM se incrementa en $\sim 4\%$.

Debido a que δD_C se correlaciona con el desplazamiento de las paredes de dominio como $\delta D_C = 2\langle s \rangle|_{H_C}$, concluimos que el crecimiento de tamaño de los dominios FM en el campo crítico H_C es $\delta D_C \sim 2\xi$. Usando la relación $\delta D_C/D \sim 0.04$, la estimación del tamaño de los *clusters* FM es

$$D \sim 50\xi \sim 130\text{nm} \quad (8)$$

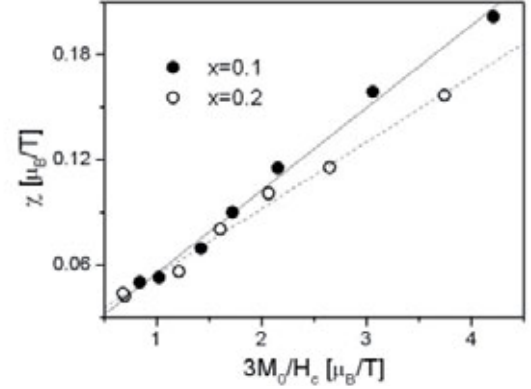


Figura 6. Susceptibilidad χ como función del parámetro $3M_0/H_C$. Estos datos muestran una relación lineal bastante aceptable, como se espera para un sistema de *clusters* ferromagnéticos en expansión.

Este valor está en muy buen acuerdo con observaciones directas obtenidas mediante espectroscopía túnel de barrido [7] y microscopía electrónica [8,10] en otras manganitas fuertemente dopadas, y difiere ampliamente de los tamaños $D \sim 1\text{nm}$ encontrados en compuestos levemente dopados como el $\text{La}_{0.95}\text{Ca}_{0.05}\text{MnO}_3$ [15].

El pequeño tamaño de los centros de anclaje, $\xi \sim 7a_0$, sugiere que el potencial de anclaje no puede ser generado por factores extrínsecos, como por ejemplo inhomogeneidades químicas, los cuales ocurrirían a escalas mucho mayores. Por el contrario, la causa del anclaje de las paredes de dominio es intrínseca del material, y ocurre a escala microscópica.

Es entonces importante notar que el área característica de las paredes de dominio ($\sim D \times D$), es mucho mayor que el tamaño característico de los centros de anclaje, ξ . Es por esto que, si bien *a priori* no puede ser completamente descartado, el anclaje debido al *mismatch* del sitio *A* parece poco probable. Este tipo de desorden produciría centros de anclaje puntuales localizados en un pequeño entorno de cada uno de los iones del sitio *A*. Resulta difícil de explicar cómo un objeto extendido de $130\text{nm} \times 130\text{nm}$ es capaz de “ver” defectos puntuales de apenas 3nm distribuidos homogéneamente en el material. De hecho, teorías de anclaje colectivo desarrolladas en el marco del anclaje de vórtices en superconductores predicen que en tal caso no sería posible anclar objetos extendidos. Más aún, en muestras de $\text{Pr}_{1-y}\text{Ca}_y\text{MnO}_3$ el *mismatch* del sitio *A* es reducido casi por completo debido a que el Pr^{3+} y el Ca^{2+} tiene iguales radios iónicos. Sin embargo, el crecimiento abrupto de los dominios FM en un campo crítico aún se observa en experimentos de magnetización [28]. Por otro lado, estos mismos experimentos muestran que la dinámica de la expansión de la fase FM tiene características martensíticas, lo cual apunta fuertemente

al *self-trapping* de las paredes de dominio en los campos de tensiones generados a su alrededor. Al mismo tiempo, como las paredes de dominio deben “arrastrar” sus deformaciones estructurales resulta inevitable que la dinámica se vea afectada. Este comportamiento sería similar al de la dinámica de polarones, donde una carga eléctrica disminuye su movilidad debido a que debe arrastrar la deformación estructural generada en su entorno [33]. En el caso de las paredes de dominio, el tamaño de los centros de anclaje, $\xi \sim 7a_0$, estaría indicando la escala de longitud donde se extiende el campo de tensiones alrededor de las interfaces FM/AFM. Estos resultados respaldan la idea de que la separación de fases podría deberse a la influencia de las tensiones en el entorno de las interfaces magnéticas, produciendo un congelamiento de la dinámica de las paredes de dominio [10,27,28].

Es claro que el panorama aquí presentado para la dinámica de las paredes de dominio bajo la influencia de un campo magnético externo es la descripción más simple para este problema. Por ejemplo, hemos considerado dominios FM aislados, lo cual podría no ser del todo cierto para fracciones de volumen FM mayores que el umbral crítico de percolación $X_C \sim 16\%$ [29]. Además, un modelo más estricto debería considerar a las paredes de dominio como objetos elásticos extendidos, y también debería tener en cuenta distribuciones en los valores de los parámetros relevantes como H_C , U_0 , ξ y D . Más allá de estas limitaciones, nuestro modelo basado en el desanclaje de las paredes de dominio en H_C captura la física esencial del mecanismo de crecimiento de los *clusters* FM con el campo magnético aplicado.

Conclusiones

La aplicación de un campo magnético en manganitas con separación de fases produce una importante reducción de la resistividad eléctrica, un fenómeno conocido como Magnetorresistencia Colosal. Este comportamiento está relacionado al crecimiento de los *clusters* ferromagnéticos metálicos, favorecido por la energía Zeeman. Sin embargo, hemos mostrado que el anclaje de las paredes de dominio que separan las fases FM y AFM da lugar a la aparición de dos regímenes dinámicos bien diferenciados, cuya frontera es el campo crítico H_C . Cuando el campo magnético alcanza este valor crítico la presión magnética sobrepasa a la fuerza de anclaje, liberando de esta forma a las paredes de dominio de sus centros de anclaje y produciendo un rápido crecimiento del volumen FM. Para $H < H_C$ las curvas $M(H)$ exhiben una dependencia lineal, con una susceptibilidad térmicamente activada cuya energía de activación corresponde a la energía de anclaje $U_0 \sim 100 \text{ meV}$. De los datos de susceptibilidad también estimamos que los dominios FM tienen un tamaño de $\sim 130 \text{ nm}$, lo que involucra $\sim 10^7$ sitios de Mn, en

concordancia con observaciones previas. Mediante el modelo propuesto dedujimos un potencial de anclaje de carácter local, a escala de algunas distancias interatómicas, el cual indica que el mismo es generado por una fuente intrínseca de desorden. Probablemente este desorden provenga de las tensiones estructurales generadas en torno a las paredes de dominio, lo cual podría ser también la causa del fenómeno de separación de fases en diversas perovskitas de manganeso.

Referencias bibliográficas

1. S. Jin, T.H. Tiefel, M. McCormack, R.A. Fastnach, R. Ramesh, and L.H. Chen, Science 264, 413 (1994).
2. H.Y. Hwang, S-W. Cheong, N.P. Ong, and B. Batlogg, Phys. Rev. Lett 77, 2041 (1996).
3. J.M.D. Coey, A.E. Berkowitz, L.I. Balcells, F.F. Putris, and A. Barry, Phys. Rev. Lett. 80, 3815 (1998).
4. D. Niebieskikwiat, A. Caneiro, R.D. Sánchez, and J. Fontcuberta, Phys. Rev. B 64, 180406(R) (2001); K-I. Kobayashi, T. Kimura, H. Sawada, K. Terakura, and Y. Tokura, Nature (London) 395, 677 (1998).
5. Artículo de revisión: J.M.D. Coey, M. Viret, and S. von Molnár, Adv. Phys. 48, 167 (1999), y referencias allí.
6. E. Dagotto, Nanoscale Phase separation and Colossal Magnetoresistance (Springer, Germany, 2003). Ver también el artículo de revisión: E. Dagotto, T. Hotta, and A. Moreo, Phys. Rep. 344, 1 (2001), y referencias allí.
7. M. Fäth, S. Freisem, A.A. Menovsky, Y. Tomioka, J. Aarts, and J.A. Mydosh, Science 285, 1540 (1999).
8. M. Uehara, S. Mori, C.H. Chen, and S-W. Cheong, Nature (London) 399, 560 (1999).
9. E.O. Wollan and W.C. Koehler, Phys. Rev. 100, 545 (1955).
10. J. Tao, D. Niebieskikwiat, M.B. Salamon, and J.M. Zuo, Phys. Rev. Lett. 94, 147206 (2005); S. Mori, C.H. Chen, and S-W. Cheong, Phys. Rev. Lett. 81, 3972 (1998).
11. G. Allodi, R. De Renzi, F. Licci, and M.W. Pieper, Phys. Rev. Lett. 81, 4736 (1998).
12. M.M. Savosta, A.S. Karnachev, S. Krupipka, J. Hejtmánek, Z. Jiráček, M. Maryško, and P. Novák, Phys. Rev. B 62, 545 (2000).
13. Q. Huang, J.W. Lynn, R.W. Erwin, A. Santoro, D.C. Dender, V.N. Smolyaninova, K. Ghosh, and R.L. Greene, Phys. Rev. B 61, 8895 (2000).
14. C. Ritter, R. Mahendiran, M.R. Ibarra, L. Morellon, A. Maignan, B. Raveau, and C.N.R. Rao, Phys. Rev. B 61, R9229 (2000).
15. M. Hennion, F. Moussa, G. Biotteau, J. Rodríguez-Carvajal, L. Pinsard, and A.

- Revcolevschi, Phys. Rev. Lett. 81, 1957 (1998); M. Hennion, F. Moussa, J. Rodríguez-Carvajal, L. Pinsard, and A. Revcolevschi, Phys. Rev. B 56, R497 (1997).
16. V. Hardy, A. Wahl, C. Martin, and Ch. Simon, Phys. Rev. B 63, 224403 (2001).
 17. N.A. Babushkina, A.N. Taldenkov, L.M. Belova, E.A. Chistotina, O. Yu. Gorbenko, A.R. Kaul, K.I. Kugel, and D.I. Khomskii, Phys. Rev. B 62, R6081 (2000).
 18. D. Niebieskikwiat, R.D. Sánchez, A. Caneiro, and B. Alascio, Phys. Rev. B 63, 212402 (2001).
 19. D. Niebieskikwiat, R.D. Sánchez, and A. Caneiro, J. Magn. Magn. Mater. 237, 241 (2001).
 20. S. Yunoki, J. Hu, A.L. Malvezzi, A. Moreo, N. Furukawa, and E. Dagotto, Phys. Rev. Lett. 80, 845 (1998); A. Moreo, S. Yunoki, and E. Dagotto, Science 283, 2034 (1999).
 21. J. Lorenzana, C. Castellani, and C. Di Castro, Phys. Rev. B 64, 235127 (2001).
 22. M.Y. Kagan, D.I. Khomskii, and M.V. Mostovoy, Eur. Phys. J. B 12, 217 (1999).
 23. A. Moreo, M. Mayr, A. Feiguin, S. Yunoki, and E. Dagotto, Phys. Rev. Lett. 84, 5568 (2000).
 24. M.B. Salamon, P. Lin, and S.H. Chun, Phys. Rev. Lett. 88, 197203 (2002).
 25. D. Niebieskikwiat and R.D. Sánchez, J. Magn. Magn. Mater. 221, 285 (2000).
 26. L.M. Rodríguez-Martínez and J.P. Attfield, Phys. Rev. B 63, 024424 (2001); D. Akahoshi, M. Uchida, Y. Tomioka, T. Arima, Y. Matsui, and Y. Tokura, Phys. Rev. Lett. 90, 177203 (2003).
 27. K.H. Ahn, T. Lookman, and A.R. Bishop, Nature (London) 428, 401 (2004).
 28. V. Hardy, S. Majumdar, S.J. Crowe, M.R. Lees, D. McK. Paul, L. Hervé, A. Maignan, S. Hébert, C. Martin, C. Yaicle, M. Hervieu, and B. Raveau, Phys. Rev. B 69, 020407 (2004); R. ahendiran, A. Maignan, S. Hébert, C. Martin, M. Hervieu, B. Raveau, J.F. Mitchell, and P. Schiffer, Phys. Rev. Lett. 89, 286602 (2002); T. Wu and J.F. Mitchell, J. Magn. Magn. Mater. 292, 25 (2005).
 29. D. Niebieskikwiat, R.D. Sánchez, L. Morales, and B. Maierov, Phys. Rev. B 66, 134422 (2002).
 30. M. Mayr, A. Moreo, J.A. Vergés, J. Arispe, A. Feiguin, and E. Dagotto, Phys. Rev. Lett. 86, 135 (2001).
 31. D. Niebieskikwiat, A. Caneiro, and R.D. Sánchez, J. Appl. Phys. 93, 8080 (2003).
 32. Ch. Renner, G. Aepli, B-G. Kim, Y-A. Soh, and S-W. Cheong, Nature (London) 416, 518 (2002).
 33. M. Jaime, M.B. Salamon, K. Pettit, M. Rubinstein, R.E. Treece, J.S. Horwitz, and D.B. Chrisey, Appl. Phys. Lett. 68, 1576 (1996). Ver también el artículo de revisión: M.B. Salamon

and M. Jaime, Rev. Mod. Phys. 73, 583 (2001), y referencias allí.

UN ALGORITMO SIMPLE Y EFICIENTE PARA LA CLASIFICACIÓN AUTOMÁTICA DE PÁGINAS WEB

María del Cisne García* Fausto Pasmay Enrique V. Carrera

Colegio de Ciencias e Ingeniería, USFQ

Resumen

Este artículo propone un simple pero eficiente clasificador de páginas Web basado en la frecuencia de términos. La simplicidad está dada por el uso de un conjunto pequeño de términos para describir cada clase, mientras que la eficiencia es alcanzada mediante embolsamiento. El uso de atributos simples como la frecuencia de términos también reduce la complejidad de los algoritmos de preprocesamiento y extracción de características. Sin embargo, un problema de usar propiedades dependientes de los términos incluidos en cada página es la selección de la descripción de términos correspondiente para cada una de las clases. En este trabajo, la selección de términos para cada clase se basa en el coeficiente TFIDF, mientras que el embolsamiento utiliza clasificadores probados como redes neuronales y algoritmos bayesianos. Los resultados de nuestra evaluación muestran un clasificador sumamente rápido con una exactitud superior al 83 %.

Palabras Clave. Minería de datos, clasificación, frecuencia de términos, embolsamiento, *World Wide Web*.

Introducción

La clasificación o caracterización de páginas Web es el proceso mediante el cual se asigna una o más etiquetas predefinidas a cada documento expuesto en la Web. La tarea de clasificación es a menudo vista como un problema de aprendizaje supervisado en el cual un conjunto de datos previamente etiquetados es usado para entrenar un clasificador que puede posteriormente ser aplicado para etiquetar ejemplos futuros [1].

La clasificación de páginas Web es esencial para muchos procesos de administración y recuperación de información como el rastreo focalizado de páginas Web [2] y el desarrollo asistido de directorios [3]. La clasificación de páginas Web puede también mejorar la calidad de las búsquedas mediante el filtrado de contenido [4, 5] y la navegación asistida [6]. Basados en la importancia de estas aplicaciones y en el rápido crecimiento de la Web, consideramos que la clasificación automática de páginas asumirá un rol preponderante en los futuros servicios de búsqueda.

Sin embargo, la naturaleza incontrolable de los contenidos Web genera desafíos adicionales para la implementación de una clasificación correcta y eficiente [7]. Las páginas Web normalmente contienen ruido, como anuncios y barras de navegación, que impide la aplicación directa de la mayoría de métodos convencionales de clasificación. El ruido intrínseco de las páginas Web produce desviaciones significativas dentro de cualquier algoritmo de clasificación, haciendo que se pierda fácilmente la orientación sobre el tópico principal de su contenido.

Adicionalmente, el diseño de un clasificador requiere balancear el compromiso existente entre exactitud y ef-

ciencia. Clasificadores sumamente exactos requieren algoritmos complejos y costosos, reduciendo su eficiencia desde el punto de vista de desempeño. Clasificadores rápidos, por otro lado, no son del todo exactos. De lo expuesto hasta el momento, además de perseguir exactitud en la clasificación, los clasificadores de páginas Web requieren considerar la complejidad de los algoritmos a implementar de manera que puedan mantener sus requisitos computacionales en niveles razonables. Esta condición es más crítica todavía si consideramos que la mayoría de aplicaciones mencionadas anteriormente requieren clasificar cientos o inclusive miles de páginas por segundo.

Fundamentados en esto, nosotros proponemos un clasificador de páginas Web que se basa en la frecuencia de términos, principalmente. El uso de un atributo tan simple como la frecuencia de términos permite reducir la complejidad del clasificador y alcanzar un buen desempeño. Además de alto desempeño, nuestro clasificador también busca exactitud y por ello emplea varios algoritmos ya probados como redes neuronales [8] y clasificadores bayesianos [9] combinados mediante la técnica denominada embolsamiento [10].

Con la finalidad de lograr los objetivos propuestos, tener una implementación modular y permitir una evaluación pormenorizada, nuestro clasificador de páginas Web consta de tres etapas claramente definidas: el preprocesamiento de las páginas, su clasificación misma y la etapa de entrenamiento de los clasificadores. La etapa de preprocesamiento consiste de una serie de filtros que extraen la mayoría de términos requeridos para discriminar las diferentes páginas, reduciendo la dimensionalidad de la información a tratar. Los algoritmos de preprocesamiento presentan una complejidad lineal con el

tamaño del documento. Por su parte, la tarea de clasificación aplica el conjunto de características sintetizadas en la fase de preprocesamiento a un conjunto de clasificadores previamente entrenados. Varios algoritmos de clasificación simples son agrupados mediante embolsamiento con la finalidad de aumentar la exactitud de la clasificación. Finalmente, la etapa de entrenamiento tiene por objetivo construir el modelo de clasificación usando ejemplos de páginas Web previamente categorizadas. Esta etapa es realizada una sola vez fuera de línea.

Antes de describir con mayores detalles la estructura propuesta para nuestro clasificador, revisemos algunos fundamentos teóricos usados en nuestro trabajo.

Fundamentos Teóricos

En esta sección se introducen los diferentes tipos de clasificación existentes en el contexto de las páginas Web, la forma de calcular el coeficiente TFIDF y la teoría detrás de la técnica de embolsamiento.

Clasificación de Páginas Web. El problema general de clasificar páginas Web puede ser dividido en múltiples subproblemas: clasificación temática, clasificación funcional, clasificación sentimental, entre otras [7]. Nuestro trabajo se centra en la clasificación temática, la misma que está orientada a distinguir el tópico principal de cada página Web.

Desde el punto de vista de la clasificación misma, esta tarea puede depender del número de clases existentes (clasificación binaria o de múltiples clases), del número de clases que pueden ser asignadas (clasificación con etiqueta única o de múltiples etiquetas), del tipo de asignación permitida (clasificación rígida o variable) y de la organización de las categorías (clasificación plana o jerárquica). El presente estudio se enfoca en la clasificación de múltiples clases usando una sola etiqueta cuya asignación es rígida (*i.e.*, no se permite estados intermedios) y las clases presentan una estructura plana.

El Coeficiente TFIDF. El coeficiente TFIDF (*Term Frequency-Inverse Document Frequency*) [11] es una ponderación usada a menudo en tareas de recuperación de información y minería de texto. El coeficiente es una medida estadística usada para evaluar cuán importante es una palabra respecto a un documento perteneciente a una colección o cuerpo de documentos. La importancia de cada palabra incrementa proporcionalmente con el número de veces que ella aparece en el documento pero se ve influenciada por la frecuencia de la palabra en el cuerpo de documentos. Variaciones del esquema de ponderación TFIDF son usados a menudo por los motores de búsqueda como una herramienta para la puntuación y ranqueo de la relevancia de un documento ante una consulta de usuario determinada.

La frecuencia de un término (TF) en un documento dado es simplemente el número de veces que el término aparece en ese documento. Este valor es usualmente normalizado para prevenir que documentos extensos adquieran una inusual ventaja. De esta forma, la importancia

del término t_i en el documento d_j está dada por:

$$TF_{i,j} = \frac{n_{i,j}}{\sum_k n_{k,j}}$$

donde $n_{i,j}$ es el número de ocurrencias de término considerado en el documento d_j , y el denominador es el número de ocurrencias de todos los términos en el documento d_j .

La frecuencia inversa de los documentos (IDF) es una medida de la importancia general del término y se calcula mediante:

$$IDF_i = \log \frac{|D|}{|\{d_j : t_i \in d_j\}|}$$

donde el numerador es el número total de documentos en el cuerpo y el denominador es el número de documentos donde el término t_i aparece (*i.e.*, $n_{i,j} \neq 0$).

Así, el coeficiente TFIDF para el término t_i en el documento d_j es:

$$TFIDF_{i,j} = TF_{i,j} \times IDF_i$$

Un valor TFIDF alto es alcanzado por un término con alta frecuencia en el documento considerado, pero baja frecuencia en la colección total de documentos. De esta manera, el coeficiente tiende a filtrar términos comunes.

Embolsamiento. Este es un concepto asociado al área de minería de datos y se aplica principalmente a la tarea de clasificación. La idea central del embolsamiento es combinar la salida de varios clasificadores o predictores individuales implementados muchas veces por técnicas de modelamiento distintas, pero entrenados bajo un mismo conjunto de datos. La combinación de la salida de los varios clasificadores se lleva a cabo mediante un simple mecanismo de votación.

Esta técnica se usa para contrarrestar las deficiencias de cada uno de los clasificadores individuales, además de reducir la inestabilidad inherente de los resultados cuando se tienen modelos complejos aplicados a conjuntos de datos pequeños. De esta forma, un clasificador basado en embolsamiento tiene normalmente una mayor exactitud que cualquier técnica de clasificación individual entrenada con el mismo conjunto de datos. Adicionalmente, el embolsamiento ayuda a incrementar la robustez del clasificador ante el ingreso de datos ruidosos, ya que el modelo compuesto reduce la varianza de los clasificadores individuales.

Breiman [10] inclusive mostró que el embolsamiento es principalmente efectivo en algoritmos de aprendizaje “inestables” como redes neuronales y árboles de decisión, donde pequeños cambios en el conjunto de entrenamiento producen grandes variaciones en su predicción.

Clasificador Basado en la Frecuencia de Términos

Nuestro clasificador incluye dos tareas fundamentales y completamente aisladas: el preprocesamiento de la página Web y su correspondiente clasificación. Sin embargo,

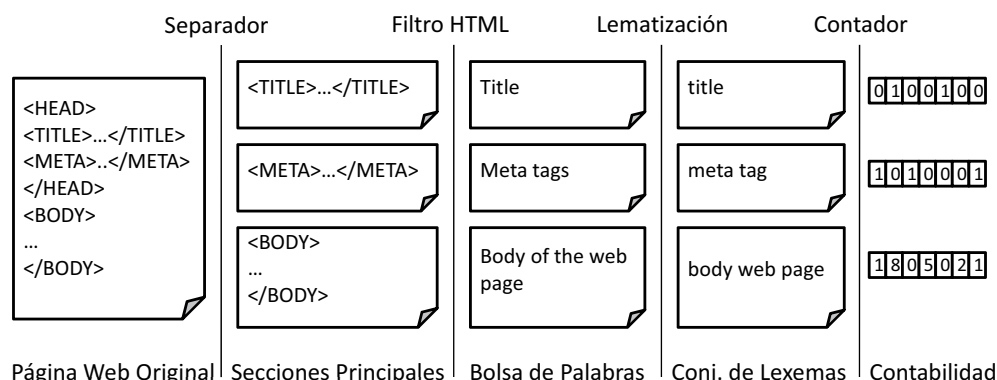


Figura 1. Preprocesamiento de una página Web

una tercera tarea llevada a cabo una sola vez es también incluida: el entrenamiento de los clasificadores. Estas tres tareas son descritas a continuación.

Preprocesamiento. La tarea de preprocesamiento puede ser descrita de una manera gráfica mediante el diagrama de la figura 1. Podemos ver que cada página Web es descargada y separada en tres secciones: (i) el título de la página, (ii) sus *meta* datos, y (iii) el cuerpo mismo del documento. Está división está justificada por la alta relevancia que tienen elementos como el título y los *meta* datos en la defición del tópico principal de una página Web [12]. Mediante esta división se permite ponderar dinámicamente la importancia relativa de cada sección.

Las tres secciones son entonces filtradas de manera independiente para eliminar todas sus etiquetas HTML. De esta forma, cada sección se convierte en una *bolsa de palabras* sin ningún tipo de formatación. Posteriormente, cada bolsa de palabras es procesada mediante el algoritmo de Paice/Husk para encontrar los lexemas o raíces comunes de cada palabra. El uso de lexemas en lugar de sus variantes morfológicas tiene la ventaja de incrementar la tasa de asociación al agrupar términos con igual raíz a pesar de sus terminaciones diferentes.

Finalmente, los lexemas resultantes son filtrados conforme el conjunto de términos relevantes para la mayoría de categorías. El conjunto de términos relevantes para cada categoría es obtenido mediante la selección de los lexemas con mayor valor TFIDF dentro de su respectivo conjunto de páginas Web de entrenamiento. Cada categoría aporta con un número pequeño de términos y estos se encuentran agrupados en una lista única propia de cada sección. Usando la lista correspondiente de la sección procesada, este último filtro devuelve un vector con el número de veces que cada término relevante aparece en el conjunto de lexemas encontrados en la página Web. En otras palabras, cada uno de los componentes i del vector indica el número de veces que el término relevante t_i aparece en el conjunto de lexemas producidos.

Puede observarse que el conjunto de algoritmos usados por la tarea de preprocesamiento son procedimientos bien entendidos y relativamente baratos en términos de recursos computacionales. De hecho, la complejidad de la tarea de preprocesamiento es lineal con el tamaño

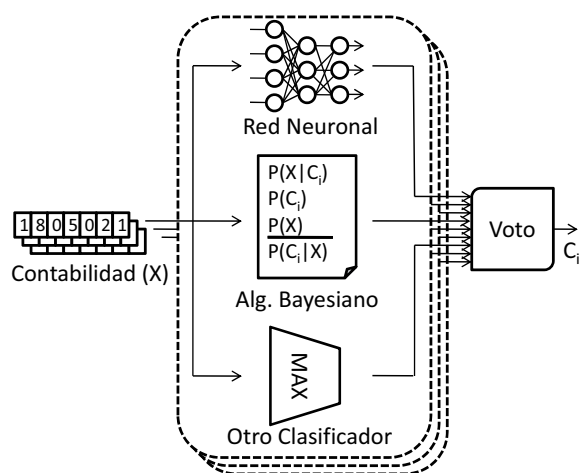


Figura 2. Clasificación mediante embolsamiento.

del documento HTML. Además, si bien las técnicas de preprocesamiento son simples, ellas son lo suficientemente inteligentes como para extraer la mayoría de características importantes de cada página. Es también importante notar que nuestra extracción de características reduce la dimensionalidad del problema al sintetizar un número pequeño de características relevantes. Esta reducción de dimensionalidad puede ser ajustada dinámicamente en función de la cantidad de términos que se escoja para representar cada clase.

Clasificación. La tarea de clasificación está esquematizada en la figura 2. Como se observa en dicha figura, cada vector contabilizando el número de lexemas relevantes dentro de cada página Web es presentado por separado a su conjunto de clasificadores (embolsamiento) de manera simultánea. Cada vector es entonces clasificado por tres modelos independientes previamente entrenados. En nuestro clasificador se han usado redes neuronales, algoritmos bayesianos y la mayoría de términos.

La red neuronal usa un esquema de recordación sin realimentación que fue entrenado mediante el algoritmo de retro-propagación del error. Retro-propagación es un método común de aprendizaje supervisado basado en el método del gradiente descendente [8]. Con relación a los algoritmos bayesianos, nuestro clasificador usa el clasificador ingenuo de Bayes, el mismo que aplica el teorema de Bayes asumiendo total independencia pro-



Figura 3. Interfase de clasificación

babilística entre sus variables. Este clasificador puede ser entrenado de manera bastante eficiente y trabaja mucho mejor de lo esperado en varias situaciones complejas del mundo real [9]. Finalmente, la mayoría de términos es un clasificador elemental que asigna una página a una clase usando únicamente el lexema con mayor repetición dentro de la contabilización generada por la tarea de preprocesamiento.

Puede observarse que la complejidad de clasificación de estas tres técnicas es bastante baja, especialmente el clasificador bayesiano y el uso de la mayoría de términos. En conjunto, a través del uso de embolsamiento se genera un clasificador bastante robusto y relativamente exacto que decide la clase final mediante una votación proporcional entre cada una de los clasificadores individuales y cada una de las secciones de la página Web.

Entrenamiento. Este es un proceso que se realiza fuera de línea por una sola ocasión. Es una tarea demorada y depende directamente del número de páginas Web de entrenamiento seleccionadas. De cualquier forma, el proceso de entrenamiento inicia obteniendo el conjunto de lexemas más relevantes a cada categoría. Para ello, cada página del conjunto de entrenamiento es preprocesada hasta convertirla en un conjunto de lexemas. Una vez que todas las páginas se han convertido en conjuntos de lexemas, se procede a calcular los coeficientes TFIDF de cada lexema existente en los documentos de entrenamiento. Para finalizar esta primera parte, se ordenan los valores TFIDF dentro de cada categoría y se escogen los lexemas correspondientes a los valores TFIDF más altos.

El número de lexemas escogidos para cada categoría es un parámetro variable que sin duda generará resultados diferentes durante el proceso de clasificación de nuevas páginas Web.

Una vez escogidos los lexemas más relevantes a cada clase y combinados en listas únicas dependientes de la sección procesada, se terminan de preprocesar los conjuntos de lexemas usados para entrenamiento hasta convertirlos en vectores que contabilizan el número de lexemas relevantes que posee cada página. Estos vectores son entonces usados para entrenar tanto la red neuronal como el clasificador bayesiano, antes descritos.

Categorías	Aciertos (%)
Arte	88
Negocios	82
Computadores	86
Educación	86
Entretenimiento	84
Gobierno	80
Salud	84
Noticias	80
Deportes	82
Referencia	78
Ciencia	82
Sociología	80
Sociedad	84
Promedio	83

Cuadro 1. Resultados de exactitud.

Evaluación

Con la finalidad de evaluar el clasificador propuesto, hemos desarrollado un prototipo inicial basado en la plataforma Java. Más específicamente, se utilizó el JDK 1.6 ejecutando sobre una máquina Pentium 4 con 1MB de memoria RAM y con el sistema operativo Linux (kernel 2.6.24).

La implementación del sistema clasificador incluye seis clases fundamentales que permiten el uso de una interfase gráfica como la presentada en la figura 3. El proceso de entrenamiento usa otras cuatro clases adicionales para el cálculo de los coeficientes TFIDF y el entrenamiento de los clasificadores correspondientes. Además de clasificar cualquier página Web individual, nuestro prototipo mantiene un directorio con todas las páginas ya clasificadas.

La configuración inicial del prototipo accesa un listado de 1300 documentos HTML previamente clasificados por el directorio de *Yahoo!* en 13 categorías básicas [3]. Cada categoría contribuye con 100 páginas Web al listado general. De todas las 1300 páginas pre-clasificadas, se usaron 910 (70 %) para el proceso de entrenamiento y las restantes 390 (30 %) para la verificación de exactitud del clasificador.

Durante el proceso de entrenamiento se escogieron únicamente los cinco términos más significativos a cada clase de acuerdo al valor de sus coeficientes TFIDF. De esta manera, se terminó generando vectores de 65 enteros para cada una de las 910 páginas de entrenamiento. Esos vectores fueron entonces usados para entrenar los diferentes clasificadores individuales que son usados mediante el esquema de embolsamiento.

El cuadro 1 muestra los resultados obtenidos con relación a la exactitud del clasificador una vez que las 390 páginas de prueba fueron aplicadas al sistema entrenado. Este cuadro resume los resultados porcentuales dentro de cada categoría y el valor promedio global.

Con relación al tiempo de ejecución, se pudo determinar que su mayor costo se encuentra en la descarga de

la página Web antes que en el procesamiento de la misma. En otras palabras, nuestra aplicación se encuentra al momento limitada por la latencia de la red antes que por la velocidad de procesamiento.

Conclusiones

El presente trabajo demuestra la importancia que está adquiriendo la tarea de clasificación de páginas Web y lo compleja que puede llegar a ser dicha tarea. Existe la necesidad de balancear exactitud con desempeño y hacia esa meta apunta el presente trabajo. Mediante la selección de técnicas de preprocesamiento simples se ha logrado extraer información crítica de cada uno de los documentos HTML y posteriormente discriminarlos con una exactitud bastante buena.

Como trabajos futuros en la misma dirección destacamos el refinamiento del prototipo inicial para permitir otros algoritmos de clasificación dentro del embolsamiento y la variación del número de características usadas para discriminar entre categorías diferentes.

Referencias bibliográficas

- [1] Han, J. and Kamber, M. 2006. *Data Mining – Concepts and Techniques*, Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, CA, 2nd edition.
- [2] Pant, G. and Menczer, F. 2003. Topical crawling for business intelligence. In ECDL pp. 233–244.
- [3] Yahoo! 2008. Yahoo Directory. <http://dir.yahoo.com>.
- [4] Ambrosini, L., Cirillo, V., and Micarelli, A. 1997. A hybrid architecture for user-adapted information filtering on the World Wide Web. In Proceedings of the 6th International Conference on User Modeling pp. 59–61.
- [5] Paez, S., Pasmay, F., and Carrera, E. V. 2008. Improving personalized web search. Technical Report (*work in progress*). Department of Systems Engineering, University San Francisco of Quito.
- [6] Joachims, T., Freitag, D., and Mitchell, T. M. 1997. Web Watcher: A tour guide for the World Wide Web. In IJCAI (1) pp. 770–777.
- [7] Qi, X. and Davison, B. D. 2007. Web page classification: Features and algorithms. Technical Report LU-CSE-07-010. Department of Computer Science and Engineering, Lehigh University.
- [8] Gupta, M. M., Jin, L., and Homma, N. 2003. *Static and Dynamic Neural Networks*, Wiley-Interscience, Hoboken, NJ, 1st edition.
- [9] Zhang, H. 2004. The optimality of Naïve Bayes. In Valerie Barr and Zdravko Markov, (ed.), FLAIRS Conference, AAAI Press.
- [10] Breiman, L. 1996. Bagging predictors. *Machine Learning*. 2(24), 123–140.
- [11] Singhal, A., Salton, G., Mitra, M., and Buckley, C. 1996. Document length normalization. *Information Processing and Management*. 5(32), 619–633.
- [12] Shen, D., Chen, Z., Yang, Q., Zeng, H.-J., Zhang, B., Lu, Y., and Ma, W.-Y. 2004. Web-page classification through summarization. In Proceedings of the 27th Annual Inter-

national Conference on Research and Development in Information Retrieval New York, NY, USA: ACM Press. pp. 242–249.

DIFERENCIACIÓN MOLECULAR EN VARIEDADES CULTIVADAS DE TOMATE DE ÁRBOL (*Solanum betaceum*), MEDIANTE LA TÉCNICA MOLECULAR DE AFLP

Soledad R. Ordoñez A. Maria de L. Torres P.* Venancio S. Arahana B.

Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales, USFQ.

Resumen

Esta investigación tuvo como objetivo determinar molecularmente el nivel de variabilidad genética intra e inter varietal existente en los cultivos de *Solanum betaceum* en tres provincias del Ecuador, Imbabura, Pichincha y Tungurahua y, basado en esto, identificar las seis variedades reconocidas desde el punto de vista morfológico (amarillo puntón, amarillo gigante, amarillo bola, morado gigante, morado bola y morado común). Se incluyó de cuatro a cinco individuos por variedad, para un total de 26 accesiones objeto del estudio. La técnica usada fue la amplificación al azar de fragmentos polimórficos de ADN, AFLP. Se seleccionó 8 combinaciones de primers que se consideraron como las más informativas por el número y definición de bandas en el gel y el nivel de polimorfismo develado. Se encontró variabilidad limitada entre accesiones, teniendo un máximo del 18% de distancia entre genotipos del tipo amarillo con respecto a los del tipo morado, pero no fue posible distinguirlas con respecto a la forma del fruto ni a la provincia de origen. Las combinaciones de primers usadas, detectaron un 60% de polimorfismo entre accesiones y permitieron establecer que los individuos muestreados no representaban genotipos completamente diferenciables debido quizá a su elevado nivel de cruzamiento intervarietal. En futuros estudios sería necesario incluir individuos de poblaciones silvestres que puedan aportar información sobre los orígenes de la variabilidad existente en el cultivo de tomate de árbol del Ecuador.

Palabras Clave. AFLP, Polimorfismo, *Solanum betaceum*.

Introducción

Solanum betaceum o tomate de árbol es un arbusto endémico de la región oriental de los Andes [1]. Se caracteriza por su fruto ovoide o redondeado, dependiendo de la variedad. Su mesocarpio es de color amarillo, morado o tomate, con cáscara lisa y gruesa variando su color de rojo a amarillo [2]. Albornoz y Cadena, por estudios fenotípicos reconocen que en Ecuador existen 5 variedades. Dos variedades similares a las que debieron ser las primeras plantas de tomate de árbol domesticadas, (amarilla y negra), una tercera variedad “Criollo”, dividida en dos subvariedades, (puntón y redondo), y una quinta variedad roja [3,4]. En esta investigación se usa las variedades que distingue el agricultor y que resultan de la combinación de dos caracteres del fruto: color (amarillo o morado) y forma (puntón, gigante o bola), dando un total de 6 posibles variedades (Figura 1).



Figura 1. Frutos de las variedades de tomate de árbol: morado gigante, amarillo gigante, morado puntón, amarillo puntón, amarillo puntón y amarillo bola.

El tomate de árbol es un cultivo económicamente importante en los países andinos como Ecuador,

Colombia y Perú. Ecuador empezó a exportar esta fruta en la década de los 80's pero hasta ahora no ha logrado ampliar considerablemente el mercado de exportación. Una razón es la dificultad de producir frutos homogéneos en forma y color. [3,5]

Debido a la poca información existente sobre la variabilidad genética de especies endémicas, basada en estudios moleculares, esta investigación tuvo como objetivo principal iniciar el estudio de la variabilidad inter e intra varietal del tomate de árbol en los actuales cultivos ecuatorianos, centrándose en las provincias de Pichincha, Tungurahua e Imbabura. Conociendo la variabilidad genética de la especie a futuro se podrá desarrollar estrategias de conservación para evitar una posible erosión genética, encontrar variedades resistentes a plagas, mejorar la selección en cultivos y el rendimiento de los mismos y, en el aspecto económico, ampliar el mercado de exportación.

En este estudio se utilizó la técnica AFLP que es una de las más efectivas para la obtención de un gran número de marcadores de loci independientes no específicos. Comparado con otras técnicas, los marcadores AFLPs presentan algunas ventajas, una de estas es la obtención de mayor información sobre variaciones dentro de una especie [6]. En investigaciones como la actual, con una especie que no ha sido estudiada anteriormente a nivel molecular, y donde se conoce que la variabilidad es escasa, los marcadores AFLP han dado buenos resultados [6,7, 8].

Materiales y métodos

Material vegetal: Se recolectó frutos maduros de las seis variedades de tomate de árbol (amarillo puntón, amarillo bola, morado gigante, morado puntón, morado bola, y amarillo bola), en las provincias de Pichincha, Tungurahua e Imbabura.

Se extrajo las semillas separándolas por variedad y por individuo, se lavaron en agua corriente y se las dejó secar por 24 horas. El proceso de esterilización comenzó sumergiendo las semillas por 5 minutos en etanol 70%, y luego fueron lavadas en agua destilada estéril. Posteriormente se sumergieron, durante 20 minutos, en una solución de hipoclorito de sodio al 2.5% a la que se adicionó cuatro gotas de Tween 20. Finalmente, las semillas fueron lavadas cuatro veces con agua destilada estéril.

Se sembró las semillas en medio MS con 30 g/L de sacarosa y 7 g/L de agar a pH 5.8 [9]. El número de semillas por frasco fue de 6 a 7. Durante el proceso de germinación y crecimiento, las semillas estuvieron en un cuarto de cultivo con un fotoperiodo de 16 horas luz/8 horas oscuridad, a 22°C de temperatura. Cuando las plantas tuvieron un tamaño de más o menos 4 cm. se las subcultivó en medio MS [9].

Extracción y cuantificación de DNA:

De las plantas crecidas in vitro se maceró dos hojas por planta (total 26 plantas) en un mortero con 800 µl de buffer de extracción CTAB hasta obtener una solución homogénea la cual se transfirió a un tubo eppendorf de 1.5ml, adicionando 8 µl de β-mercapto etanol. Seguidamente, se mantuvo a 62°C por una hora, agitando cada 15 minutos.

Se adicionó 500 µl de cloroformo/ alcohol isoamílico 25:1 y se agitó hasta obtener una mezcla homogénea, la misma que se dejó en reposo por 20 minutos. Luego se centrifugó los tubos a 13.000 rpm por 20 minutos. El sobrenadante se transfirió a otro tubo eppendorf donde se adicionó un volumen de isopropanol agitando hasta que los hilos de ADN fueron visibles. Por último, el pellet de ADN fue separado y transferido a otro tubo eppendorf, donde se lavó tres veces con etanol al 76%/ 0.2M de Acetato de Sodio, 76% alcohol/10mM Acetato de amonio y alcohol al 70% respectivamente. El pellet se secó a temperatura ambiente y se resuspendió en 70 µl de TE estéril [10]. El ADN fue cuantificado en un espectrofotómetro Pharmacia Biotech *Ultraespec 2000* y se diluyó cada muestra para obtener una concentración final de 100ng/ µl.

Amplificación AFLPs:

Se utilizó el protocolo del manual de AFLP de Invitrogen, que consta de las siguientes etapas :

Restricción: se realizó adicionando 2 µl de EcoRI/MseI a 5µl de la muestra diluida de ADN, 5 µl del buffer de

reacción y 13 µl de agua destilada estéril, en un tubo eppendorf de 1.5ml. Se centrifugó por pocos segundos y se llevó a 37°C por dos horas. Luego de lo cual se mantuvo a 70°C por 15 min y finalmente se centrifugó antes de guardar los tubos a -20°C.

Ligación de los adaptadores: A la muestra de ADN previamente cortada con las enzimas EcoRI y MseI, se le adicionó 24 µl de la solución de adaptadores proveniente del Kit de AFLPs y 1µl de T4 ADN ligasa, centrifugando por pocos segundos. Como paso final, la mezcla se incubó a temperatura ambiente por 1h y se guardó a -20°C.

Preamplificación: en un tubo de microcentrífuga de 0.2 ml. se adicionó 5 µl de la muestra de ADN previamente ligada con adaptadores, 40 µl de la solución *Preamp primer Mix1*, 5 µl del buffer 10x para PCR y 1 µl de Taq polimerasa. El ciclaje de la PCR se realizó según el manual del Kit de AFLP de Invitrogen.

Amplificación selectiva: se usó ocho combinaciones de primers (Tabla 1), junto con las 26 muestras de ADN anteriormente preamplificadas. La mezcla de reacción por cada muestra contenía 5 µl de la solución con los primers, 10 µl de la solución de polimerasa y 5 µl de ADN de la muestra específica preamplificada. El ciclo del PCR fue igual al descrito en el manual del Kit de AFLP de Invitrogen. De la amplificación selectiva solo 24 muestras pudieron ser analizadas, de las cuales cinco correspondieron a la variedad amarillo gigante, cinco a morado gigante, cinco al amarillo común, cinco a las variedades Bola, y cuatro a la variedad morado común o puntón

Electroforesis:

La comprobación de los resultados obtenidos en cada etapa del proceso de AFLPs, como también, para la elección de los pares de primers a utilizarse en la amplificación selectiva, se realizó en gel de agarosa al 1%, adicionando 5 µl de bromuro de etidio por cada 100 ml de gel. El gel corrió durante dos horas a 80 V.

Los productos de la amplificación selectiva de cada una de las muestras con los diferentes pares de primers se analizaron en geles denaturalizantes de poliacrilamida 6% [11]. Cada posillo del gel llevó 5µl de la muestra respectiva y se utilizó 1µl de ADN ladder 100 bp de Invitrogen en una relación de 1:3 con el buffer de carga, se corrió a 85 a 100 watts por 2h y 30', de 45 a 50°C.

Tinción con plata: Para la tinción del gel de poliacrilamida, se usó el protocolo de Benbouza H. [12].

Selección de primers: se probaron 44 combinaciones de primers sugeridas en el manual del Kit AFLP de *Invitrogen*, utilizando una muestra de ADN de tomate de árbol del tipo "amarillo".

Análisis de datos: Las bandas observadas mediante tinción con plata en los geles de poliacrilamida se

transformaron a datos binarios y se construyeron matrices básicas de datos (MDBs). Las bandas con buena resolución se registraron como (1) presencia o (0) ausencia y esos datos fueron ingresados en una tabla de Excel. Para la transformación de las matrices de datos a matrices de similitud se utilizó el programa NTSYCpc 2.11. Los coeficientes de asociación elegidos para el análisis de cada combinación de primers fueron Dice y Nei.

De las matrices de similitud obtenidas, con el coeficiente de Dice, se construyeron árboles fenéticos usando la opción "Clustering" de NTSYs y dentro de ésta la opción "SAHN" (*Sequential Agglomerative Hierarchical Nesting*, por sus siglas en inglés), y UPGMA (Unweighted Pair Group Method, Arithmetic averaging, por sus siglas en inglés). Con la matriz de distancias generada con el coeficiente de Nei se utilizó la opción "Neighbor joining" para el agrupamiento de las muestras.

La validez de los árboles fenéticos se comprobó mediante un análisis del coeficiente de correlación co-fenético, realizado también con el programa NTSYSpc 2.11

Resultados y discusión

Selección de primers: Los pares de primers puestos a prueba, en su mayoría, mostraron productos de amplificación del ADN; por su definición y claridad se usaron las siguientes combinaciones; 18 (M-CAA/E-AAG), 26 (M-CAC/E-ACA), 6 (M-CTG/E-ACA), 7 (M-CAA/E-ACG), 8 (M-CTC/E-ACG), 43 (M-CTG/E-ACG), 46 (M-CAC/E-ACT), y 5 (M-CAT/E-ACT).

Variabilidad: Con los ocho pares de primers eleccionados para la amplificación selectiva se obtuvo un total de 183 marcadores, siendo 110 polimórficos (60%) (Tabla 1). Este porcentaje de polimorfismo indica que hay cierto grado de variabilidad genética, entre los genotipos analizados, que podría ser utilizada con fines de mejoramiento. [13]

Los pesos de las bandas encontradas variaron entre 800 a 100 pb. Las bandas utilizadas para el análisis fueron las que presentaron mayor definición en el gel de acrilamida; y fueron las bandas comprendidas entre los 200 pb.y los 600 pb.

El número de bandas generadas por cada combinación de primers fue de 8 a 46. Esto tiene mucho que ver con la secuencia de los tres últimos nucleótidos en los primers selectivos. La cantidad de Citocinas y Guaninas, vuelve al primer más selectivo y hace más difícil la unión al ADN que los nucleótidos A, T. Esto se debe a que las regiones con más pares C-G son más compactas, haciendo más difícil la unión del primer.

Otra de las razones es que, en las plantas la concentración de pares A-T es mucho mayor a la de C-G, por lo que los pares de primers con mayor cantidad de A-T tendrán mayor oportunidad de unirse al DNA, lo que concuerda con los resultados obtenidos. [14]

Número	Primers selectivos	Marcadores obtenidos	Marcadores polimórficos	Polimorfismo por combinación de primers(%)
18	M-CAA E-AAG	34	19	53.4%
26	M-CAC E-ACA	46	36	78.3%
6	M-CTG E-ACA	21	11	52.4%
7	M-CAA E-ACG	18	9	50%
8	M-CTC E-ACG	21	14	66.7%
43	M-CTG E-ACG	8	8	100%
46	M-CAC E-ACT	25	10	40%
5	M-CAT E-ACT	10	3	30%

Tabla 1. Número asignado para la combinación de primers EcoR 1/Mse 1, secuencia arbitraria de primers selectivos, marcadores obtenidos por combinación y número y porcentaje de marcadores = polimórficos.

La variabilidad observada entre genotipos no fue mayor al 20%, tanto entre variedades, como a nivel intravarietal. Esto puede deberse a que cada genotipo provino de una semilla distinta, aumentando así las diferencias entre individuos. Otra razón puede ser que debido a la mezcla de variedades en los campos de cultivo y a un cierto nivel de alogamia, es posible que estén ocurriendo cruzamientos espontáneos entre variedades.

El nivel de variabilidad encontrado permitió diferenciar los genotipos solo en relación al color del fruto, más no con respecto a la forma del fruto ni al origen del mismo.

Análisis de similitud y agrupamiento:

Se analizaron por separado los datos generados por cada par de primers y luego se combinaron aquellos cuyos resultados eran más congruentes con las características morfológicas; con ellos se construyó dos fenogramas finales utilizando el coeficiente de Dice y Nei respectivamente.

Las combinaciones de primers que generaron la mayor cantidad de datos y lograron agrupar los diferentes genotipos por color de fruto fueron: 8 (M-CTC/E-ACG), 18 (M-CAA/E-AAG), 26 (M-CAC/E-ACA), y 46 (M-CAC/E-ACT).

El fenograma UPGMA (Figura 2) construido a partir de la matriz generada con el algoritmo de Dice, distingue dos grupos, uno incluye la mayoría de genotipos del tipo morado y el otro incluye a la mayoría del tipo amarillo, con un coeficiente de similitud de 0.86 entre ellos. Como excepción, dentro del grupo del tipo amarillo, se encuentran dos genotipos, B5 y B4, de la variedad Bola morado, según la clasificación que da el agricultor. Otras excepciones son la agrupación de los genotipos Mc1P y Mg4P del tipo morado, que se acerca más a los genotipos del tipo amarillo y la separación del genotipo Ac4P con un coeficiente de 0.73 con respecto a las demás muestras.

El coeficiente de similitud (0.86) obtenido en el fenograma final (con el coeficiente de Dice), indica un 14% de diferencia entre el grupo que contiene a

los genotipos amarillos y el grupo que contiene a los genotipos morados. Esto talvez no sea suficiente como para determinar una separación a nivel de variedades, aunque el porcentaje de distancia específico requerido para determinar una variedad no está definido.[15]

El fenograma también sugiere que las muestras que se analizaron representaban a genotipos producto de la mezcla entre las diferentes “variedades” en el área de cultivo. Esta observación también sustentaría lo planteado por Alborno. [3]

En resumen, el número de muestras y combinación de primers utilizados fueron suficientes para separar a los genotipos por el color del fruto (amarillo o morado). Comparado con otros estudios que tratan sobre variabilidad intravarietal, el número de pares de primers y el número de muestras utilizados es similar [13, 17]. Aunque las agrupaciones de las muestras de tomate de árbol obtenidas en los fenogramas no diferencian a los genotipos por la forma del fruto, sino solo por color, es posible que aumentando la combinación de primers se puedan encontrar marcadores ligados a las características

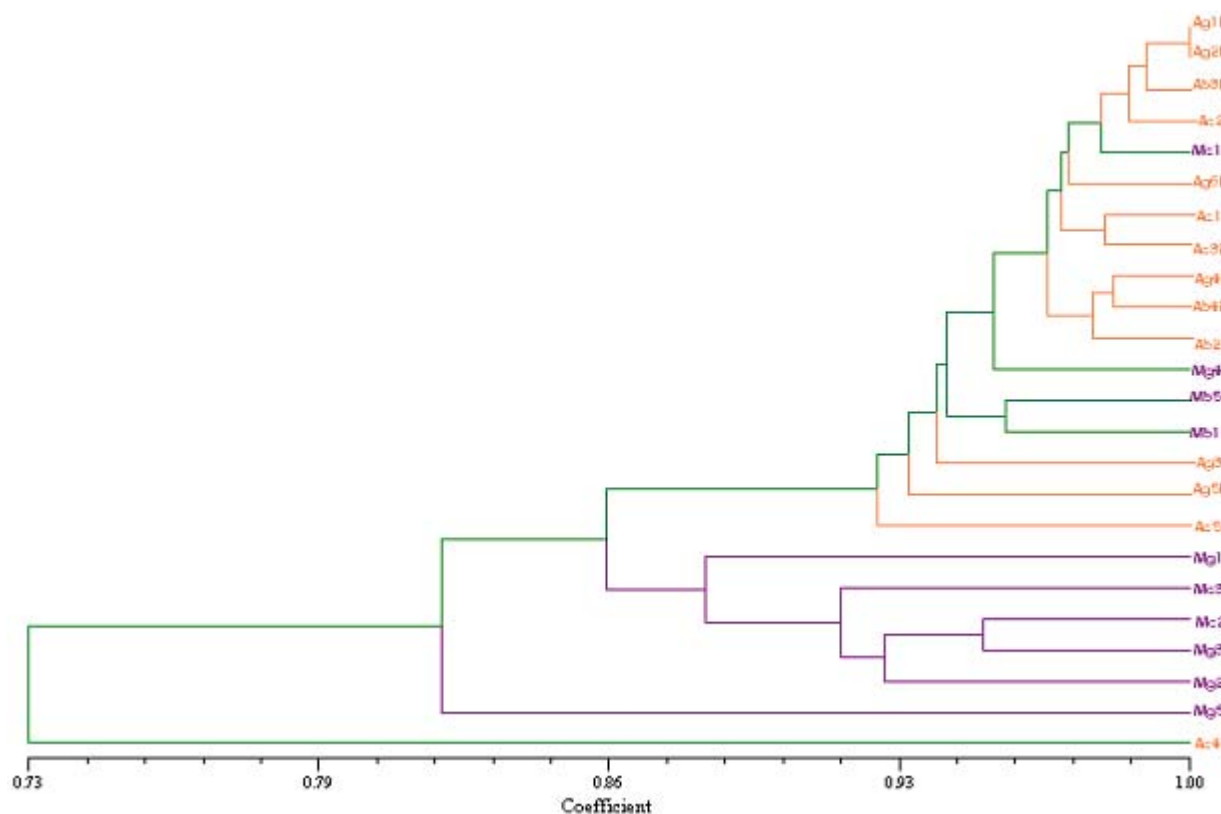


Figura 2. Fenograma UPGMA generado por NTSYS 2.11, usando el coeficiente Dice y basado en ocho combinaciones de primers. Se puede observar que el genotipo Ac4P se diferencia un 27% del resto. Los genotipos del tipo amarillo están agrupados con una semejanza del 86% con respecto a los genotipos morados (resaltados en negrilla), con excepción de Mg4P, Mb5P, Mb1P y Mc1P, que son mucho más cercanos a los genotipos del tipo amarillo.

En el fenograma obtenido con la función “Neighbor joining” (Figura 3), se puede ver también la diferencia entre los genotipos del tipo morado y los del tipo amarillo. El grupo que contiene a las muestras del tipo amarillo se encuentra “dividido” en dos, ya que el grupo morado, aunque más distante del resto de muestras (0.11 de distancia), se ubica en el centro.

El genotipo Ac4P parece ser distinto a todas las demás muestras, con una distancia de más o menos 0.20 del genotipo más cercano, que es Ac5P.

El valor co-fenético del fenograma final se obtuvo como se describe en la metodología. El valor $r = 0.91$ obtenido indica que el grado de distorsión del fenograma con respecto a la matriz de similitud de la cual fue obtenido es de 0.09 y se acerca al ideal [16].

morfológicas que son usadas por Alborno para definir las variedades.[3].

Con esta investigación se puede concluir que las plantaciones de *Solanum betaceum* en la sierra ecuatoriana están conformados por cultivos heterogéneos. Posiblemente la falta de selección y separación entre los individuos produjo que el actual cultivo no tenga genotipos completamente diferenciados, sino una mezcla, que puede haber sido el producto del cruce entre posibles variedades iniciales. Estudios posteriores deberán abarcar un análisis más amplio de marcadores moleculares y la inclusión de accesiones silvestres para obtener información más completa sobre el origen de la variabilidad presente en el tomate de árbol cultivado en el Ecuador.

Agradecimientos

Al grupo de Investigación del Laboratorio de Agro-Biotecnología de la Universidad San Francisco: en especial a Andrea Arias y Nicolás Peñafiel, por el apoyo con experiencia durante toda la investigación hasta su culminación. Esta investigación fue financiada por el convenio USFQ-CONESUP dentro del marco del proyecto: “Estrategias biotecnológicas para la determinación de la variabilidad genética y la búsqueda de resistencia al nemátodo agallador en tomate de árbol”

“Tomate de árbol (*Ciphomandra betacea* sendt.) frutal promisorio para la diversificación del agro andino”. INIAP. 2006

6. Manubens A., Sergio Lobos, Yael Jadue, Manuel Toro, Rosa Messina, Manuel Lladserl y Daniela Seelenfreund. “DNA Isolation and AFLP Fingerprinting of Nectarine and Peach Varieties (*Prunus persica*)”. *Plant Molecular Biology Reporter* 17 (1999) 255–267.
7. INCIRLI A., Hatice BILGI., y M. S. AKKAYA. “Assessment of Polymorphic AFLP Markers in

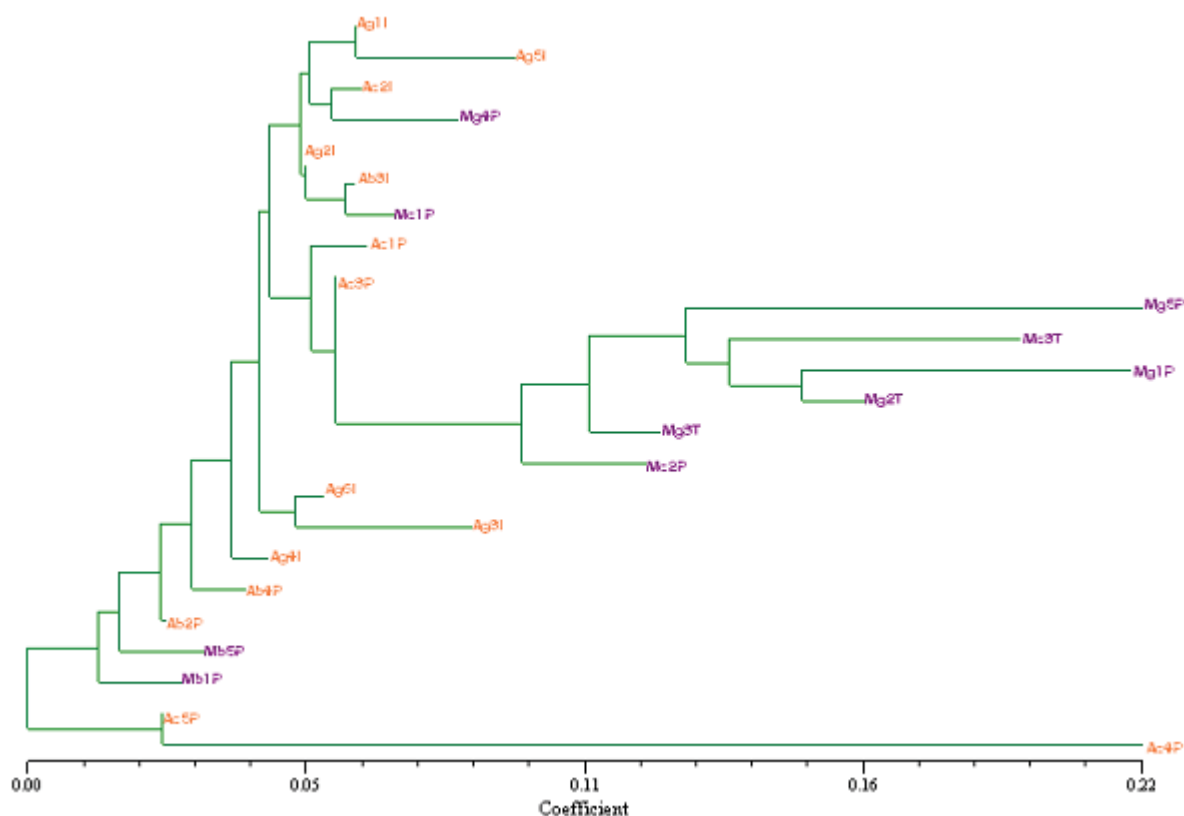


Figura 3. Fenograma Neighbor Joining, generado por NTSYS 2.11 usando el coeficiente de Nei y basado en ocho combinaciones de primers. Se puede observar una distancia mayor entre los genotipos morados (resaltados en negrilla) con relación a los genotipos amarillos, con excepción de los genotipos Mc1P, Mc4P, Mb5P y Mb1P, que parecen estar más relacionados con los genotipos del tipo amarillo.

Referencias bibliográficas

1. LEBN, Juan, 1996, “A guide for the cultivation of tomarillo”, INIAP-COTESU
2. Aristizábal J.C. “Efecto de las Podas, Distancias de Siembra y Sistemas de Manejo Sobre el Crecimiento y Producción del Tomate de Árbol(*Solanum betaceum* Sendt.)”. *Frutales* 19 (1998).
3. Albornoz G. “El tomate de árbol, Determinación de las características varietales”. Universidad Central del Ecuador (1992).
4. Cadena E. “Estudio de Prefactibilidad para el Tomate de Árbol”. SICA, Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador. 13 Enero 2007.<<http://www.sica.gov.ec/agronegocios>>
5. Tápia Cesar, Eddie Zambrano, Eduardo Morillo. *Triticum durum* and *Aegilops* sp.” Middle East Technical University (2000).
6. Matthew D., Perry Michael R., Davey J., Brian Power, Kenneth C., Lowe H. Frances J. Bligh Paul S., Roach and Chris Jones. “DNA Isolation and AFLPTM Genetic Fingerprinting of *Theobroma cacao* (L.)”. *Plant Molecular Biology Reporter* 16: 49–59, (1998)
7. Murashige, T y F. Skoog. “A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures”. *Physiol. Plant* 15 (1962): 473-497.
8. Shagai-Marroof M.A., Soliman K.M. Jorgensen R.A. y Allard R.W., 1984. Ribosomal DNA spacer-length polymorphisms in barley: Mendelian inheritance, chromosomal locations, and populations dynamics. *Proc Natl Acad Sci USA* 81: 8014-8018.

11. Sambrook, J., Fritsch, E. F., Maniatis, T. (1989) *Molecular Cloning: A Laboratory Manual*, 2nd Ed., Cold Spring Harbor Laboratory, Cold Spring Harbor, NY.
12. Benbouza, H., Jacquemin, J.M., Baudoin, J.P. & Mergeai, G. 2006. "Optimization of a reliable, fast, cheap and sensitive silver staining method to detect SSR markers in polyacrylamide gels." *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 10 (2): 77-81.
13. Manubens A., Sergio Lobos, Yael Jadue, Manuel Toro, Rosa Messina, Manuel Lladser1 y Daniela Seelenfreund. "DNA Isolation and AFLP Fingerprinting of Nectarine and Peach Varieties (*Prunus persica*)". *Plant Molecular Biology Reporter* 17 (1999) 255–267.
14. S. Coulibaly · R.S. Pasquet · R. Papa · P. Gepts AFLP analysis of the phenetic organization and genetic diversity of *Vigna unguiculata* L. Walp. reveals extensive gene flow between wild and domesticated types. *Theor Appl Genet* (2002) 104:358–366.
15. Rohlf F.J. "Guía para el uso del programa NTSYS-pc" *Introducción a la Taxonomía* (1998).
16. Pringle G. J, Brian G. Murray. "Karyotype Diversity and Nuclear DNA Variation in *Ciphomandra*". *Solanaceae III*. Royal Botanic Gardens Kew and Linnean Society of London (1991).
17. Van Droogenbroeck B., P. Breyne, P. Goetghebeur, E. Romeijn-Peeters, T. Kyndt, G. Gheysen. "AFLP analysis of genetic relationships among papaya and its wild relatives (Caricaceae) from Ecuador". *Theor Appl Genet* (2002) 105:289–297.

EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD GENÉTICA DEL TOMATE DE ÁRBOL (*Solanum betaceum* Cav.) EN LOS CULTIVOS DE TRES PROVINCIAS DEL ECUADOR POR MEDIO DE MARCADORES MICROSATÉLITES.

Nicolás Peñafiel L. Venancio S. Arahana B. María de L. Torres P.*

Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales, USFQ.

Resumen

El presente trabajo determinó el nivel de diversidad genética existente en varios cultivos de tomate de árbol (*Solanum betaceum*) de las provincias de Imbabura, Tungurahua y Pichincha, mediante el uso de marcadores microsatélites. Además, se evaluó el nivel de transferibilidad al tomate de árbol, de 53 pares de primers microsatélites desarrollados originalmente para papa (*Solanum tuberosum*). Se usó 50 accesiones, que abarcaron las seis variedades de tomate de árbol posibles, de acuerdo al tamaño/forma y color del mucílago del fruto. El porcentaje de pares de primers que amplificaron con éxito fue de 28.3 %. Los loci amplificados mostraron mayoritariamente un patrón monomórfico. El porcentaje de primers polimórficos fue de 7.5%. El valor PIC para cada par de primers varió entre 0.077 y 0.514. En solo 5 de los 11 loci utilizados para el análisis, se observaron individuos heterocigotos. El porcentaje de individuos heterocigotos para estos loci varió entre 4 y 98 %. El acervo genético de las accesiones analizadas parece ser estrecho y homogéneo. Se detectaron valores altos de similitud genética entre las accesiones (80 - 100%), usando el coeficiente de Jaccard. El método de agrupamiento UPGMA demostró que las accesiones no se asociaban ni por lugar de origen, ni por variedad. Estos resultados son congruentes con los obtenidos en estudios anteriores. El bajo porcentaje de transferencia de primers (28.3%) indica que las secuencias que flanquean a los microsatélites no se han conservado en el proceso de especiación de la papa y el tomate de árbol. La reducida diversidad genética en los cultivos de tomate de árbol podría explicarse por un proceso relativamente reciente de domesticación de la especie, y por una conjunción de factores geográficos/ecológicos, y fenológicos, que fomentan la homogenización genética entre y dentro de los cultivos.

Palabras Clave. *Solanum betaceum*, tomate de árbol, microsatélites, variabilidad genética.

Introducción

El tomate de árbol (*Solanum betaceum*) es un frutal de importancia comercial, en Ecuador y en varios países de la Región Andina, de donde es originario [1]. El fruto varía considerablemente en tamaño y aspecto: la piel es usualmente roja pero oscila entre amarilla hasta púrpura, a veces con rayas longitudinales oscuras; el mucílago que rodea a las semillas puede ser amarillento o morado oscuro; y la forma puede ser desde redonda hasta “puntuada” [2]. En el Ecuador, su producción con fines de exportación ha sido afectada tanto por la falta de discriminación varietal en los cultivos, como por el ataque de plagas y enfermedades a las que esta especie es sensible. La aplicación de un programa de fitomejoramiento elevaría el estándar de las plantaciones, lo que a su vez mejoraría la calidad del producto y aliviaría el impacto que las prácticas agrícolas actuales y tradicionales tienen sobre el ambiente [3]. Dentro de tal programa, el análisis molecular es un componente primordial. El conocimiento de la amplitud y la distribución de la diversidad genética dentro de un cultivo resulta invaluable para diversas aplicaciones, incluidas la caracterización molecular de variedades, cultivares e individuos; y la selección de parentales potenciales para

proyectos de hibridación e introgresión de genes de interés en el cultivo [4].

Mientras más amplia sea la variabilidad genética de una población, mayores son las opciones para que ésta enfrente con éxito los desafíos bióticos o abióticos en el futuro. La diversidad genética ofrece así, mayores posibilidades de mejorar los cultivos [5].

Los microsatélites (o SSRs) son marcadores moleculares que han sido usados con éxito para varios propósitos desde el fitomejoramiento hasta la evaluación de poblaciones orientada a la conservación [6] en una multitud de especies vegetales, muchas de ellas de importancia comercial [7]. El valor de los microsatélites reside en su condición altamente polimórfica, su naturaleza codominante, su abundancia dentro del genoma, su detección sencilla por PCR, cobertura extensa del genoma y su requerimiento de una pequeña cantidad de ADN para el análisis [6]. El carácter hipervariable de los SSRs permite discriminar eficazmente entre individuos estrechamente relacionados, lo cual es de utilidad para la identificación de cultivares [8].

Sin embargo, el desarrollo de nuevos primers para amplificar secuencias microsatélites siempre involucra un insumo de recursos y tiempo, por lo que en los casos

en los que no se puede disponer de primers desarrollados específicamente para la especie de estudio, es frecuente recurrir al uso de primers diseñados a partir de taxa cercanos [9, 10].

La utilidad de la amplificación entre especies responde tanto al porcentaje de primers que pueden ser transferidos, como de la cantidad de polimorfismo que estos muestren, lo cual a su vez varía dependiendo en gran medida del grado en que estén relacionadas las especies involucradas [11].

El presente trabajo establece la variabilidad genética intra- e inter- varietal de los cultivares de tomate de árbol en tres provincias de la Sierra ecuatoriana mediante SSRs y evalúa el grado de transferibilidad al tomate de árbol de 53 pares de primers SSR desarrollados originalmente para papa (*Solanum tuberosum*).

morado bola y morado común. Las semillas de cada fruto fueron germinadas *in vitro* en medio MS modificado (30 g de sacarosa y 8 g de agar por litro), para contar con hojas jóvenes para la extracción de ADN, la cual se ejecutó siguiendo el protocolo de CTAB [12]. Para el análisis, se probaron 53 pares de primers desarrollados originalmente para papa (*Solanum tuberosum*) y proporcionados por el Centro Internacional de la Papa (CIP) de Lima, Perú. Se utilizó geles desnaturalizantes de poliacrilamida al 6% [13] y tinción con plata de acuerdo a Benbouza et al. para evidenciar los resultados [14]. Las bandas en el gel se registraron como presencia (1) o ausencia (0) a partir de lo cual se elaboró una matriz binaria. Estos datos fueron analizados con el programa NTSTSpC 2.11.

Usando el coeficiente de Jaccard, se generó una matriz de similitud entre todas las accesiones, comparadas de dos en dos. Esta matriz fue usada para, mediante el

Código Primer	Nombre Primer ^a	Motivo microsatélite	Peso molecular (bp) ^b	Temperatura annealing (°C) ^c	Cromosoma ^d	PIC ^e	% Individuos heterocigotos	Incidencia de alelos nulos (%)
S036	STM1053	(TA) ₄ (ATC) ₅	~ 249 (168-184)	53 (53)	III	0.211	-	12
S089	STM3012	(CT) ₄ , (CT) ₈	~ 186 (153-213)	57 (57)	IX	0.147	-	8
S114	STM5114	(ACC) ₇	a: ~183 b: ~ 293 (288-308)	57 (57)	II	0.5	98	0
S140	STM5140	(AAT) ₉	a: ~ 177 b: ~ 175 (~200)	50 (57)	IV	0.255	32	0
S182	STG0004	(GT) ₆	~ 199 (~200)	55 (55)	XI	0.18	-	10
S188	STG0010	(TG) ₆	~ 173 (150-170)	54 (55)	III	0.32	-	20
S208	STG0033	(CGG) ₆	~ 157 (148-162)	55 (55)	II	0.077	-	4
S209	STI0001	(ATT) _n	a: ~ 187 b: ~ 181 (186-208)	55 (55)	IV	0.078	4	2
S221	STI0023	(CAG) _n	a: ~ 187 b: ~ 184 (130-205)	50 (60)	X	0.449	68	0
S228	STI0035	(TTC) _n	a y b : < 100 (102-115)	50 (57)	-	0.514	6	38
S231	STI0038	(CTG) _n	~ 102 (110-115)	50 (58)	V	0.241	-	14

Tabla 1. Características de los pares de primers usados para el análisis definitivo de las accesiones de tomate de árbol. ^a Este el nombre con el que se conoce el primer a nivel internacional, mientras que el código es el nombre que se le fue asignado para esta investigación. ^b El primer número es el peso aproximado del microsatélite conforme se determinó en este estudio; entre paréntesis consta el rango de peso esperado para papa; las letras designan los distintos alelos. ^c El primer número corresponde a la temperatura usada en este estudio; el segundo, entre paréntesis, es la temperatura de annealing recomendada para papa. ^d El número corresponde al cromosoma de papa. ^e Para el cálculo del PIC se consideraron también los alelos nulos.

Materiales y métodos

Se usó 50 accesiones de tomate de árbol, recogidas en 18 parcelas de cultivo seleccionadas al azar en las provincias de Imbabura, Tungurahua y Pichincha. Se colectó un fruto de cada individuo, al que se lo clasificó, de acuerdo al tamaño y forma de su fruto y al color del mucílago, en una de las siguientes variedades: amarillo común, amarillo gigante, amarillo bola, morado gigante,

método de agrupamiento UPGMA, producir un dendrograma.

El Contenido de Información Polimórfica (PIC por sus siglas en inglés) fue calculado para cada par de primers con la siguiente fórmula:

$$PIC = 1 - \sum p_i^2$$

donde p_i es la frecuencia del alelo i .

Se evaluó el nivel de heterocigosis determinando el porcentaje de individuos heterocigotos para cada locus.

De igual manera, se calculó la incidencia de alelos nulos por locus en porcentaje.

Resultados y discusión

Transferibilidad de primers

De los 53 pares de primers probados, 33 (apx. 62%) mostraron productos de amplificación. De entre estos 33, más del 50% presentaba patrones de amplificación inespecífica, en la mayoría de los casos con productos de muy elevado peso molecular. Solamente 15 de los 33 pares de primers (45.5 %; 28.3 % del total de 53) produjeron bandas de microsatélite. Cuatro de estos primers no pudieron ser usados en el análisis definitivo de las muestras porque no se contó con suficiente volumen de los mismos, por lo que solo 11 pares de primers, de entre los 15 originalmente seleccionados, fueron usados en el análisis de las muestras (Tabla 1).

Algunos de los pares de primers amplificaron bandas de microsatélites que estuvieron fuera del rango de peso detectado en papa por el CIP (Tabla 1). En general, los loci amplificados mostraron un patrón monomórfico, constituyendo los individuos heterocigotos la única forma de polimorfismo, de modo que el mayor número de alelos por locus fue de dos. El número de primers polimórficos fue 4 de 53, lo que representa el 7.5%. El valor PIC para cada par de primers varió entre 0.077 y 0.514 (Tabla 1).

La incidencia de alelos nulos por locus varió también considerablemente entre un mínimo de 0 y un máximo de 38% de los individuos (Tabla 1).

La utilidad del uso de loci microsatélites entre taxa depende de la conservación de las secuencias a las que se unen los primers y en el mantenimiento, durante largos períodos evolutivos, de secuencias microsatélites lo suficientemente largas como para generar polimorfismo [8]. De manera general, en plantas la amplificación exitosa y útil entre especies parece limitarse a congéneres, reportándose niveles medios a altos (50-100%) de transferibilidad de primers a especies del mismo género, pero no todos ellos son polimórficos (20-100%) [11]. Aún cuando un mismo set de primers se evalúa en especies cercanas del mismo género, tanto el número de primers que amplifican, como el porcentaje de éstos que muestra polimorfismo, varía considerablemente entre dichas especies [9].

De esta manera, en plantas parece ser que la distancia genética y evolutiva existente entre dos especies puede reflejarse en la cantidad de loci que pueden ser amplificados con éxito en las dos especies [10], disminuyendo la claridad y el porcentaje de microsatélites amplificados a medida que aumenta la distancia genética [9], aún entre especies del mismo género [15].

La papa y el tomate de árbol pertenecen al mismo género. Sin embargo, la amplificación aún entre distintos géneros en algunos casos ha arrojado un mayor porcentaje de loci polimórficos que el obtenido en este estudio (7.5%); el porcentaje de loci informativos reportado aquí es inusualmente bajo para primers transferidos dentro del mismo género [9, 10]. Kyndt et al. indican que es de esperar un alto porcentaje de transferibilidad entre especies dentro del mismo género cuando la especiación dentro de ese género ha sido reciente, como sucede con *Vasconcellea* [9]. En este aspecto, no se cuenta con datos que relacionen a las especies involucradas en este estudio.

Por otro lado, se ha reportado que el tamaño del genoma tiene incidencia en la eficiencia de la amplificación de los loci microsatélites. La tendencia es que mientras más grande sea el genoma de una especie, mayor es la proporción de primers que no logran producir una amplificación exitosa del ADN [16]. Los genomas del tomate de árbol y de sus especies relacionadas sobresalen por su tamaño: incluso el menor de ellos tiene más ADN que otro taxón de igual número cromosómico (24) dentro de las solanáceas [17].

El número de loci finalmente analizados en este estudio (11) es superior al promedio (8) que se maneja comúnmente en los estudios de variabilidad genética intraespecífica en plantas usando microsatélites [18]. Sin embargo, es recomendable incrementar el número de primers, para incluir al menos un locus por cromosoma y así tener una mejor cobertura del genoma [19].

Criterio de agrupación	Prom.	SD	Max.	Min.
Lugar de origen				
Imbabura	0,89	0,098	1,0	0,64
Tungurahua	0,87	0,090	1,0	0,64
Pichincha	0,83	0,111	1,0	0,50
Variedades				
Amarillos	0,86	0,089	1,0	0,60
Morados	0,84	0,114	1,0	0,50
Comunes	0,83	0,109	1,0	0,50
Gigantes	0,89	0,088	1,0	0,62
Bola	0,87	0,098	1,0	0,60

Tabla 2. Valores de similitud genética (coeficiente de Jaccard) de 50 accesiones de tomate de árbol, agrupados por variedades y lugar de origen.

Variabilidad genética

El acervo genético de las accesiones analizadas parece ser estrecho y homogéneo. Se detectaron valores altos de similitud genética entre las accesiones (80 - 100%) (Figura 1). El valor promedio de similitud genética entre las 50 accesiones analizadas con los SSRs fue de 0.85 ± 0.10 . Aún dentro de cada provincia y dentro de cada variedad, el promedio de similitud genética estuvo por encima del 80% (Tabla 2).

El dendrograma (Figura 1) mostró 23 genotipos distintos entre las 50 accesiones. En él no se observó un patrón de agrupamiento que respondiera ni al origen de las accesiones ni a ninguna característica varietal. Estos resultados son congruentes con los obtenidos en otros

El factor geográfico puede jugar también un papel determinante en los patrones de diversidad genética. Para ciertas especies vegetales, el aislamiento geográfico producido por la fragmentación del hábitat ha propiciado la diferenciación genética entre poblaciones, diferen-

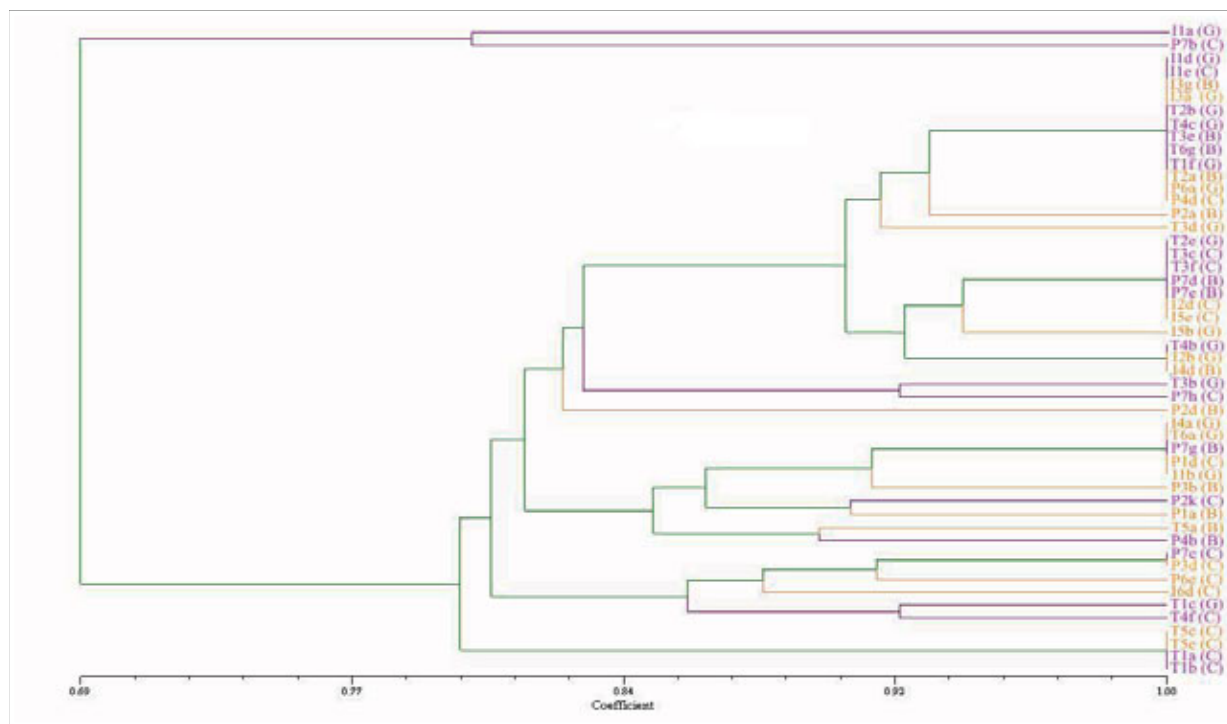


Figura 1. Dendrograma generado por el método UPGMA, usando el coeficiente de similitud de Jaccard, a partir de los patrones de bandas generadas por 11 pares de primers de SSRs en 50 accesiones de tomate de árbol. La primera letra de cada accesión denota su origen: (I) para Imbabura, (T) para Tungurahua y (P) para Pichincha. El color de cada accesión corresponde a las variedades Morado o Amarilla y las letras entre paréntesis corresponden a las variedades Gigante (G), Común (C) o Bola (B). El eje horizontal indica el valor de similitud entre las accesiones.

estudios, en los que se usaron AFLPs y microsatélites para determinar la diversidad genética de *S. betaceum* en el país [20, 21].

Se suele asociar un patrón de diversidad genética reducida con algún suceso debido al cual el número de individuos de una población disminuyó, reduciendo así también la variedad de genotipos o alelos presentes en esa población. Esta ha sido la regla para las especies vegetales que han sido sujeto de domesticación [5, 22]. La reducción de diversidad genética en las variedades de los cultivos se ha observado en casos como el trigo (*Triticum aestivum*), debido a una domesticación relativamente reciente [22].

Aunque no queda claro todavía dónde ni cuando se empezó a cultivar el tomate de árbol en Sudamérica, parece ser que su domesticación es más bien reciente [1]. Reducida diversidad genética ha sido reportada también para sandía [23], presumiblemente debido al bajo número de plantas usadas en los primeros estadios de la domesticación de este cultivo fuera de su área de origen [24].

ciación que ha sido reforzada por la floración asincrónica entre esas poblaciones [25].

En este sentido, las características geográficas donde se da el cultivo del tomate de árbol y la fenología de la planta parecen contribuir a que todas las poblaciones de este cultivo en el Ecuador sean homogéneas entre sí. El tomate de árbol en nuestro país se siembra en un continuo en todas las provincias de la Sierra, de modo que quizás la división en poblaciones por provincia o localidad sea un artificio porque en realidad las plantaciones de todo el Ecuador podrían constituir genéticamente una sola población. Las condiciones climáticas en las que se produce este cultivo no difieren mayormente entre sí, por lo que no se ha producido una adaptación local a un ambiente específico. Esto, sumado a que en el tomate de árbol predomina la exogamia a través de la polinización mediada por insectos [26], contribuiría a la homogeneización del acervo genético dentro del tomate de árbol cultivado.

A pesar de observarse una limitada variabilidad genética en el tomate de árbol cultivado, existe una gran variación morfológica en el fruto. Un fenómeno análogo

detectado entre cultivares de sandía [23] y en árboles del género *Panax* [27] parece deberse a que la mayoría de características que distinguen a los cultivares son caracteres cualitativos determinados por una o pocas mutaciones que no pudieron ser detectadas por el método empleado para el análisis [23,27]. Hasta qué punto estos escenarios se corresponden con la situación del tomate de árbol no ha sido determinado.

Los resultados presentados revelan una reducida diversidad genética en las plantaciones de *S. betaceum* en el Ecuador y constituyen un primer paso para determinar futuras acciones en el mejoramiento de este cultivo.

Agradecimientos

Quiero reconocer el apoyo brindado por el CONESUP a través del financiamiento brindado para la realización de este proyecto.

Referencias bibliográficas

- Bohs, L. 1989. "Ethnobotany of the Genus *Cyphomandra* (Solanaceae)". *Economic Botany*, 43(2): 143-163.
- Albornoz, G. 1992. *El tomate de árbol (Cyphomandra betacea Sendt.) en el Ecuador*. Universidad Central del Ecuador-Fundagro, Quito.
- Morales, J.O. 2001. "Diagnóstico agro-socio-económico del cultivo de tomate de árbol (*Cyphomandra betacea* Sendt.) en cuatro provincias de la sierra ecuatoriana (Imbabura, Pichincha, Tungurahua y Azuay)". Tesis de grado previa a la obtención de título de Ingeniero Agrónomo de la Universidad Central del Ecuador, Quito.
- Mohammadi, S.A. & Prasanna, B.M. 2003. "Analysis of Genetic Diversity in Crop Plants – Salient Statistical Tools and Considerations". *Crop Science*: 43, 1235 -1248.
- Tanksley, S.D.; Mccouch, S.R. 1997. "Seed Banks and Molecular Maps: Unlocking Genetic Potential from the Wild". *Science* 277: 1063-1066.
- Nuez, F.; Carrillo, J.M. (Eds.). 2000. *Los marcadores genéticos en la mejora vegetal*. Editorial Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- Azofeifa-Delgado, A. 2006. "Revisión Bibliográfica: Uso de marcadores moleculares en plantas; aplicaciones en frutales del trópico". *Agronomía Mesoamericana* 17(2): 221-242.
- Powell, W.; Machray, G.C.; Provan, J. 1996. "Polymorphism revealed by simple sequence repeats." *Trends in Plant Science* 1(7): 215-222.
- Kyndt, T., Van Droogenbroeck, B., Haegeman, A., Roldán-Ruiz, I. & Gheysen, G. 2006. "Cross-species microsatellite amplification in *Vasconcellea* and related genera and their use in germplasm classification." *Genome* 49: 786-798.
- Shepherd, M.; Cross, M.; Maguire, T.L.; Dieters, M.J.; Williams, C.G.; Henry, R.J. 2002. "Transpecific microsatellites for hard pines". *Theor Appl Genet* 104: 819-827.
- Peakall, R.; Gilmore, S.; Keys, W.; Morgante, M.; Rafalski, A. 1998. "Cross-species amplification of soybean (*Glycine max*) Simple Sequence Repeats (SSRs) within the genus and other legume genera: implications for the transferability of SSRs in plants." *Mol. Biol Evol* 15(10): 1275-1287.
- Saghai Maroof, M.A.; Solima, K.M.; Jorgenson, R.A.; Allard, R.W. 1984. "Ribosomal DNA spacer-length polymorphisms in barley: Mendelian inheritance, chromosomal location, and population dynamics." *Proc. Nac. Acad. Sci. USA* 81: 8014-8018.
- CIP – Centro Internacional De La Papa. 2000. *Molecular Biology Laboratory Protocols: Plant Genotyping*. Ma. del R. Herrera; M. Ghislain; D. Zhang (Eds.), Crop Improvement and Genetic Resources Department Training Manual. Tercera edición, Lima, Perú.
- Benbouza, H.; Jacquemin, J.M.; Baudoin, J.P.; Mergeai, G. 2006. "Optimization of a reliable, fast, cheap and sensitive silver staining method to detect SSR markers in polyacrylamide gels." *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 10 (2): 77-81.
- Escribano, P.; Viruel, M.A.; Hormaza, J.I. 2004. "Characterization and cross-species amplification of microsatellite markers in cherimoya (*Annona cherimola* Mill., Annonaceae)", *Primer Note. Molecular Ecology Notes* 4: 746–748.
- Garner, T.W.J. 2002. "Genome size and microsatellites: the effect of nuclear size on amplification potential." *Genome* 45: 212-215.
- Pringle, G.J.; Murray, B.G. 1991. "Karyotype Diversity and Nuclear DNA Variation in *Cyphomandra*" en *Solanaceae III: Taxonomy, Chemistry, Evolution*; ed. Hawkes, Lester, Nee & Estrada; Royal Botanic Gardens Kew and Linnean Society of London.
- Nybom, H. 2004. "Comparison of different nuclear DNA markers for estimating intraspecific genetic diversity in plants." *Molecular Ecology* 13: 1143-1155.
- Ghislain, M.; Spooner, D.M.; Rodríguez, F.; Villamón, F.; Núñez, J.; Vásquez, C.; Waugh, R.; Bonierbale, M. 2004. "Selection of highly informative and user-friendly microsatellites (SSRs) for genotyping of cultivated potato." *Theor Appl Genet* 108: 881-890.
- Tapia, C.; Zambrano, E.; Morillo, E. 2006. "Tomate de árbol (*Cyphomandra betacea* Sendt.), frutal promisorio para la diversificación del agro andino." Informe de Proyecto ejecutado por INIAP/DENAREF.
- Ordóñez, S. 2007. "Diferenciación de variedades en cultivos de tomate de árbol, *Solanum betaceum*, mediante la técnica molecular de AFLP." Tesis de

- grado presentada como requisito para la obtención de título de B.S. en Biotecnología de la Universidad San Francisco de Quito. Quito, Ecuador.
22. Reif, J.C.; Zhang, P.; Dreisigacker, S.; Warburton, M.L.; Van Ginkel, M.; Hoisington, D.; Bohn, M.; Melchinger, A.E. 2005. "Wheat Genetic Diversity Trends During Domestication and Breeding." *Theor Appl Genet* 110: 859-864.
 23. Levi, A.; Thomas, C.E.; Whener, T.C.; Zhang, X. 2001. "Low genetic diversity indicates the need to broaden the genetic base of cultivated watermelon." *HortScience* 36 (6): 1096-1101.
 24. Navot, N.; Zamir, D. 1987. "Isozyme and seed protein phylogeny of the genus *Citrullus* (Cucurbitaceae)." *Plant Syst. Evol.* 156: 61-67.
 25. González-Astorga, J.; Castillo-Campos, G. 2004. "Genetic Variability of the Narrow Endemic Tree *Antirhea aromatica* Castillo-Campos & Lorence, (Rubiaceae, Guettardeae) in a Tropical Forest of Mexico." *Annals of Botany* 93: 521-528.
 26. Lewis, D.H.; Considine, J.A. 1999. "Pollination and fruit set in the tamarillo (*Cyphomandra betacea* (Cav.) Sendt.) 1. Floral biology." *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* 27: 101-112.
 27. Zhou, S.L.; Xiong, G.M.; Li, Z.Y.; Wen, J. 2005. "Loss of genetic diversity of domesticated *Panax notoginseng* F H Chen as evidenced by ITS sequence and AFLP polymorphism: a comparative study with *P. stipuleanatus*. H T Tsai et K M Feng." *Journal of Integrative Plant Biology* 47(1): 107-115.

REGENERACIÓN DE PLANTAS DE TOMATE DE ÁRBOL (*Solanum betaceum*) A PARTIR DE PROTOPLASTOS.

Luis A. Riofrío R. Andrea S. Arias A. Venancio S. Arahana B. María L. Torres P.*

Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales, USFQ.

Resumen

El tomate de árbol (*Solanum betaceum*) es un frutal de origen andino que posee el potencial necesario para convertirse en un producto de importancia económica dentro de los mercados internacionales de exportación. El objetivo principal de esta investigación fue estandarizar un protocolo para el aislamiento de protoplastos a partir de hojas, y la obtención de plantas viables de tomate de árbol. Las modificaciones incorporadas al protocolo original permitieron obtener división de los protoplastos en todos los ensayos. Con la metodología utilizada, se obtuvo un promedio de eficacia de extracción y aislamiento de protoplastos de $4,21 \times 10^5$ protoplastos por ml. La eficiencia de formación de callos a partir de los protoplastos aislados fue baja con valores en promedio de 0,11%. Sin embargo, la regeneración de retoños a partir de los callos obtenida fue exitosa y se lograron valores de hasta el 68%. Los resultados de esta investigación demuestran que la regeneración de retoños a partir protoplastos en tomate de árbol es eficaz. En esta investigación se obtuvo plantas viables de tomate de árbol regeneradas a partir de protoplastos, lo que constituye un paso primordial para estudios posteriores, como hibridación somática, transformación genética o inducción de variación somaclonal. Técnicas que pueden contribuir al establecimiento de programas de fitomejoramiento que ayuden a incrementar los niveles de producción de esta planta.

Palabras Clave. Protoplastos; Tomate de árbol, Cultivo in-vitro.

Introducción

El tomate de árbol (*Solanum betaceum*) es un arbusto semileñoso que alcanza una altura de 2 a 3 metros y que pertenece a la familia Solanaceae. Es una especie originaria de los Andes, y crece en climas templados y fríos. El fruto es de forma ovoide o elipsoide puntiagudo, de piel lisa con mucílago de color morado, rojo, amarillo o anaranjado. En el Ecuador, el área de cultivo de tomate de árbol es de aproximadamente 5900 hectáreas, ubicadas principalmente en la Sierra [1].

En la gastronomía ecuatoriana, esta fruta tiene varios usos. Puede ser consumido directamente, o puede ser utilizado para la preparación de jugos, dulces, mermeladas, salsas y ensaladas [2]. Posee un alto valor nutricional. 100g de fruta aportan: proteínas (2g), calcio (9mg), fósforo (41mg), y ácido ascórbico (29mg), además es rico en niacina (1.07mg) y hierro (0.90 mg) [3].

La susceptibilidad del tomate de árbol a enfermedades ha causado una disminución en el cultivo de esta fruta en el Ecuador a partir del 2005 [4]. Las principales enfermedades que afectan a este cultivo son: antracnosis, oidium y nemátodos. Los nemátodos son los que causan la mayor reducción en la producción de tomate de árbol, ya que atacan a las raíces, restringiendo la absorción de nutrientes, lo que provoca un limitado desarrollo de la planta [1].

Estudios de variabilidad genética realizados en cultivares ecuatorianos de este frutal, han revelado la existencia de una reducida diversidad genética [5]. Este hallazgo plantea una limitación para programas de mejoramiento tradicional, mediante cruces entre las

diferentes variedades, lo cual sugiere la necesidad de buscar fuentes alternativas de diversidad. En este sentido, el cultivo in vitro de protoplastos puede ser una alternativa ya que es el punto de partida para la realización de hibridaciones interespecíficas, intragenéricas o para la transformación genética [6-8].

Los protoplastos son células vegetales a las que se les ha removido la pared celular. Klercker en 1892 fue el primero en aislar protoplastos mediante disrupción mecánica de la pared celular. Sin embargo no fue hasta 1960 que Cocking obtuvo altas densidades de protoplastos utilizando el método enzimático [7,8]. A partir de entonces se ha obtenido plantas regeneradas a partir de protoplastos en un sinnúmero de especies vegetales. Las condiciones de aislamiento de estas células varían entre las diferentes especies, de acuerdo al tipo de tejido utilizado, concentración de enzimas, pH de la solución enzimática (pectinasas y celulasas), y condiciones osmóticas de las soluciones utilizadas. Los medios de cultivo necesarios para la posterior regeneración de retoños a partir de los protoplastos aislados también se adaptan a los requerimientos específicos de cada especie [7-10].

El objetivo principal de esta investigación fue estandarizar un protocolo para el aislamiento de protoplastos a partir de hojas y cotiledones, y la obtención de plantas viables de tomate de árbol.

Materiales y métodos

Material Vegetal

Para el aislamiento de protoplastos se utilizó hojas de plántulas de tomate de árbol de 1 mes de edad, cultivadas in-vitro, de la variedad comercial amarillo

puntón, las cuales fueron mantenidas en oscuridad por 3 días, antes de empezar el tratamiento enzimático.

Aislamiento de protoplastos

Se utilizó el protocolo de aislamiento y cultivo de protoplastos a partir de hojas de tabaco [11] con las siguientes modificaciones; se reemplazó la solución CPW con manitol al 13% por una solución CPW con manitol al 10%. El pH de la solución CPW con enzimas fue reducido a 5,6.

Cultivo de protoplastos

Los protoplastos aislados fueron sembrados en densidades que variaron entre $2,76 \times 10^5$ y $9,86 \times 10^5$ embebidos en gotas de Mprot suplementado con sucrosa al 10% más agarosa. Las gotas tenían un diámetro de aproximadamente 1 cm y fueron colocadas en una caja petri a la que se agregó Mprot líquido con sucrosa al 10%[11].

Resultados y discusión

Edad del tejido inicial

Los cotiledones y las hojas de plántulas germinadas in-vitro, de 1 mes de edad, fueron el mejor material inicial para el aislamiento de protoplastos. Con estos tejidos se obtuvieron protoplastos de mejor aspecto al microscopio (mayor número de protoplastos intactos). Los tejidos de mayor edad, provenientes de subcultivos sucesivos in vitro, dieron como resultado un número alto de protoplastos destruidos. Adicionalmente las hojas de más de 1 mes de edad no produjeron la densidad de protoplastos necesaria para la siembra de los mismos.

Observaciones similares se han obtenido en otros estudios donde en especies como el espárrago, se comprobó que la edad del tejido inicial fue crítica para el éxito del proceso de aislamiento de protoplastos [10,].

Ensayo	1	2	3	4
Volumen de protoplastos obtenidos	1,5 ml	1,2 ml	1 ml	1 ml
Densidad de protoplastos por ml	$6,12 \times 10^5$	$2,8 \times 10^5$	$2,82 \times 10^5$	$2,76 \times 10^5$
Total protoplastos obtenidos (volumen x densidad)	$9,18 \times 10^5$	$3,36 \times 10^5$	$2,82 \times 10^5$	$2,76 \times 10^5$

Tabla 1 Densidades de protoplastos obtenidos en los 4 ensayos realizados.

Los protoplastos sembrados se incubaron en la oscuridad por 4 días a 28° C. Posteriormente, se cultivaron en un fotoperiodo de 16 horas luz y 8 horas oscuridad. Al cabo de una semana, el Mprot líquido con sucrosa al 10%, fue reemplazado por una solución de Mprot líquido con sucrosa al 3%, donde permanecieron entre 2 - 3 semanas. Al cabo de este tiempo, cada gota se dividió en 4 secciones, las cuales pasaron a una caja Petri con medio MS sólido [12] suplementado con benzilaminopurina (BAP) 4 ppm y ácido naftalénacético (NAA) 0.05 ppm.

Aproximadamente a las 4 - 5 semanas del cultivo de los protoplastos, se aislaron microcallos que fueron colocados en una nueva caja Petri con medio MS + BAP 4 ppm y NAA 0,05 ppm. Se prosiguió con los subcultivos de los callos cada 21 días. Los retoños regenerados a partir de los callos se colocaron en frascos de vidrio con medio MS, donde permanecieron hasta que desarrollaron raíces.

Las plántulas con raíces se pasaron a tierra estéril en recipientes de barro dentro de un frasco de vidrio donde fueron aclimatadas paulatinamente a la humedad ambiental durante 2 semanas. Una vez aclimatadas las plantas fueron transferidas a bolsas plásticas de siembra con tierra.

Pre-tratamiento del material inicial

El tratamiento de las plántulas in vitro en oscuridad por 3 días, previos a la extracción de protoplastos, tuvo un efecto positivo, ya que se obtuvo una densidad mayor en la fase de separación de los protoplastos en la solución de sucrosa al 20%. En otros estudios se ha demostrado también que, en algunas especies con altos contenidos de almidones en sus células, los valores de protoplastos obtenidos aumentaron al someter las plantas a la oscuridad por 3 días. Esto puede deberse principalmente a que los protoplastos aislados de hojas que han crecido en la luz acumulan gran cantidad de gránulos de almidón en el citoplasma, lo cual impide que los protoplastos sean aislados por flotación y hace difícil el ajuste osmótico de las soluciones de aislamiento [13].

Otro factor que influyó en la eficiencia de aislamiento de protoplastos, fue la reducción del pH de la solución enzimática. En observaciones al microscopio se pudo ver que a un pH 5,6 hubo una mayor degradación de las paredes celulares y se obtuvo una solución de protoplastos de color verde oscuro, indicando mayor densidad de células, que con un pH de 5,8. Aparentemente, un pH 5.6 es óptimo para las enzimas degradativas usadas. Estas observaciones se asociaron también con mejores rendimientos en la formación de paredes celulares y una alta tasa de división celular.

Estos hallazgos son comparables con estudios realizados para aislar protoplastos en varias especies vegetales e incluso algunos hongos en donde los pH más altos, dieron menores rendimientos en la densidad de protoplastos obtenida [14].

Densidades de protoplastos efectivas para la siembra

Las densidades de protoplastos obtenidas en esta investigación variaron entre $2,76 \times 10^5$ - $9,86 \times 10^5$ protoplastos por ml como se puede observar en la Tabla 1. A estas densidades fue posible establecer el cultivo de estas células. Estos datos concuerdan con las densidades (5×10^2 a 1×10^6 protoplastos por ml) utilizadas para el cultivo de protoplastos en medio sólido en otras especies [6].

Los protoplastos incubados a 28°C iniciaron su división celular al tercer día después del aislamiento. En la Figura 1 se pueden observar las diferentes etapas de división de protoplastos. En *Liriodendron tulipifera* de la familia de las magnolias y en *Ceratonia siliqua* (algarrobo), también se observó que la división celular de protoplastos empieza en este mismo periodo [9,13].

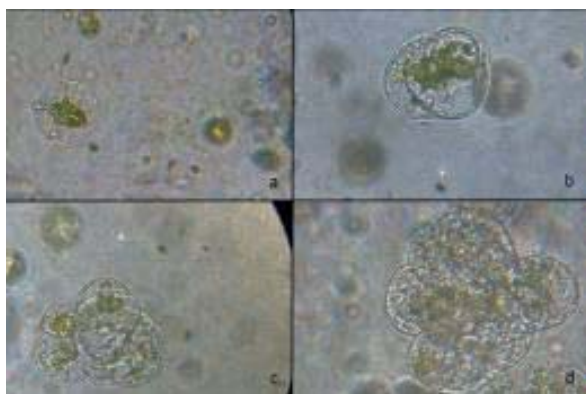


Figura 1. Primeras divisiones de los protoplastos en medio de cultivo Mprot. (a) Protoplastos a los 4 días de cultivo, se observa la primera división. (b) Protoplastos a los 7 días de cultivo, se observan colonias de 4 células. (c) Protoplastos a los 9 días de

En el caso de la densidad más alta, $9,86 \times 10^5$ protoplastos por ml, la división celular y la formación de microcallos iniciaron antes que en densidades bajas de protoplastos. Sin embargo, los microcallos resultantes de esta densidad empezaron a necrosarse y murieron a las 2 semanas de iniciado el cultivo. Este fenómeno puede deberse al agotamiento de nutrientes por la competencia generada por la alta tasa de división celular o por la acumulación de sustancias tóxicas como fenoles que pueden impedir el desarrollo normal de los callos [6]. Comparando los resultados de los diferentes experimentos realizados, se pudo determinar que la mayor eficiencia en formación de callos se obtuvo en los experimento 3 y 4 (0.26% y 0.145%) cuando se utilizaron densidades entre de $1,41 \times 10^5$ y $2,76 \times 10^5$

protoplastos por ml, respectivamente, como se puede observar en la Tabla 2. Este resultado concuerda con un estudio realizado en *Liriodendron tulipifera*, una planta leñosa, en donde se observó una elevada división celular en protoplastos sembrados en una densidad de $2-4 \times 10^5$ protoplastos por ml [12]

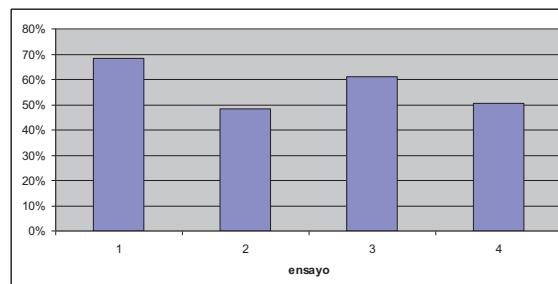


Figura 2. Porcentaje de formación de retoños en los 4 ensayos realizados

Sin embargo, el mayor porcentaje de formación de retoños se obtuvo en el experimento 1 (68%) en donde la densidad de protoplastos obtenidos fue $6,125 \times 10^5$ (Figura 2). Esta diferencia entre eficacia de formación de callo y porcentaje de formación de retoños puede deberse principalmente a que al producirse un menor número de microcallos se puede optimizar las formación de retoños debido a una menor competencia entre los agregados celulares por los nutrientes disponibles en el medio y el efecto hormonal. El porcentaje promedio de formación de retoños fue del 57%. Los retoños obtenidos presentaron morfología normal y en dos semanas se obtuvieron plántulas enraizadas que pudieron ser aclimatadas y transferidas a tierra con un porcentaje de supervivencia del 85% (Figura 3).

Este estudio reporta un protocolo eficiente de aislamiento y purificación de protoplastos en tomate de árbol a partir de hojas y cotiledones cultivados in vitro. La metodología descrita en esta investigación permitirá la realización de estudios posteriores que contribuyan al fitomejoramiento de esta interesante planta andina de potencial económico para el Ecuador.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el convenio USFQ-CONESUP dentro del marco del proyecto: “Estrategias biotecnológicas para la determinación de la variabilidad genética y la búsqueda de resistencia al nemátodo agallador en tomate de árbol”

Adicionalmente agradecemos a los integrantes del Laboratorio de Biotecnología Vegetal de la Universidad San Francisco de Quito por su apoyo y contribuciones al desarrollo de este proyecto.



Figura 3. Retoños de tomate de árbol obtenidos a partir de protoplastos: (a) Retoños que presentan enraizamiento en medio MS. (b) Proceso de aclimatación en tierra. (c) Plantas, listas para ser cultivadas en campo.

Referencias bibliográficas

1. Servicio de Información y Censo Agropecuario. Ministerio de Agricultura, Ganadería, acuacultura y Pesca del Ecuador. Censo del tomate de árbol. 2005
2. Federación Nacional de cafeteros de Colombia. *El cultivo del tomate de árbol*
3. Orihuela M. 1997 *Tomate andino, manual práctico para su cultivo y uso* Centro "Bartolomé de Las Casas.
4. BCE. Banco Central del Ecuador. 2005. *Estadísticas andina-pais*. Partida 0819030000.
5. Peñafiel N. et al 2007. *Evaluación de la variabilidad genética del tomate de árbol (Solanum betaceum Cav.) en los cultivos de tres provincias del Ecuador por medio de marcadores microsatélites*. Universidad San Francisco de Quito. Quito Ecuador
6. Dixon R. A. and Gonzales R. A. 1994 *Plant Cell Culture A practical Approach*. Oxford University Press. .
7. George J. Wagner; Henry C. Butcher IV; Harold W. Siegelman 1978 *The Plant Protoplast: A Useful Tool for Plant Research and Student Instruction*. BioScience, 28: pp. 95-101
8. Navratilova B. Protoplast 2004 *cultures and protoplast fusion focused on Brassicaceae*. Horticulture science (Prague) 4: pp. 140-157
9. Merkle S. A.; Sommer H. E. 1987 *Regeneration of liriodendron tulipifera (family magnoliaceae) from protoplast culture*. American Journal of Botany, 76: pp 1317-1321
10. Chen Guangyu A. J. Conner; M. C. Christey; A. G. Fautrier; R. J. Field. 1997 *Protoplast Isolation from Shoots of Asparagus Cultures*. International Journal of Plant Science, 158: pp. 537-542.
11. Reinert M; Yeoman M. 1982. *Plant Cell and Tissue Culture*
12. Murashige, T y F. Skoog. "A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures". *Physiol. Plant* 15 (1962): 473-497.
13. Simens J. and Sacristán M. D. 1994 *Plant regeneration from mesophyll protoplasts of matthiola incana*. Plant cell reports pp. 446-449
14. Gary B. Dunphy; Richard A. Nolan. Effects of Physical Factors on Protoplasts of *Entomophthora egressa* *Mycologia*, Vol. 71, No. 3. (May - Jun., 1979), pp. 589-602.
15. Penelope Sotirioua., Stephen C. Fryb and Caroline G. Spyropoulos. 2007 *Protoplast isolation and culture from carob (Ceratonia siliqua) hypocotyls: ability of regenerated protoplasts to produce mannose-containing polysaccharides*. Physiologia Plantarum 130: pp. 11-22

CAYENDO HACIA UN AGUJERO NEGRO DE SCHWARZSCHILD

Carlos A. Marín*

Colegio de Ciencias e Ingeniería, USFQ.

Resumen

Se describe lo que le sucedería a un observador al caer hacia el horizonte de sucesos de un agujero negro de Schwarzschild, así como la existencia de una órbita circular estable alrededor de dicho agujero. También se analiza la posible producción de agujeros negros cuánticos en aceleradores de partículas como el LHC.

Palabras clave: agujeros negros, relatividad, geodésicas, aceleradores

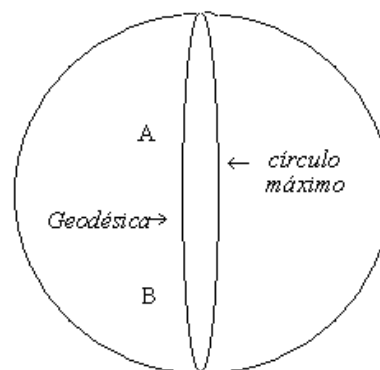
1. Introducción

Entre 1908 y 1914, Albert Einstein realizó varios intentos sin éxito para obtener una teoría de la Gravitación que fuera compatible con la Teoría Especial de la Relatividad (1905). En 1915 finalmente lo logró y la llamó “*Teoría General de la Relatividad*”[1]. Para la formulación de la Teoría General de la Relatividad, Einstein se basó en el principio de equivalencia[2] entre la masa inercial (una medida de la resistencia que presenta un objeto a adquirir movimiento acelerado cuando se le aplica una fuerza) y la masa gravitacional (la masa del objeto en un campo gravitacional), el cual a su vez implica la imposibilidad de distinguir entre aceleración y gravedad. En palabras de Einstein[3]: “Un observador encerrado en un elevador no tiene forma de saber si el ascensor está en reposo (o moviéndose con movimiento rectilíneo uniforme) en un campo gravitacional estático o si está moviéndose en una región libre de gravitación con un movimiento acelerado que es mantenido por fuerzas que actúan sobre el elevador”. Einstein se dio cuenta de que esta equivalencia sólo podía mantenerse si existía una conexión entre la fuerza gravitatoria y la geometría del espacio.

La genialidad de Einstein fue suponer que el espacio-tiempo no es plano, sino que está curvado debido a la distribución de materia y energía en él presente. Así por ejemplo, la Tierra se mueve alrededor del Sol en una órbita elíptica, no debido a la acción de una fuerza gravitacional, sino más bien debido al hecho de que el espacio-tiempo alrededor del Sol está curvado; entonces, la Tierra sigue la trayectoria más parecida a una recta en el espacio-tiempo curvo. La superficie de la tierra, por ejemplo, es una superficie curva bidimensional sin bordes o límites; sobre dicha superficie la distancia más corta entre dos puntos no es una línea recta sino un arco de círculo máximo llamado geodésica. Una geodésica es la distancia más corta entre dos puntos en una superficie curva. La distancia más corta entre dos aeropuertos (por ejemplo los aeropuertos de Quito y Boston) es una geodésica, de manera que si

quisiéramos ir de Quito a Boston lo más rápidamente posible tendríamos que viajar a lo largo de la geodésica que conecta dichas ciudades.

En Relatividad General, las trayectorias de partículas sujetas a la acción de fuerzas no nulas se pueden interpretar como geodésicas en un espacio donde el tensor de curvatura de Riemann-Christoffel (que determina la curvatura del espacio-tiempo) no es nulo. Esto es equivalente a introducir marcos de referencia acelerados, que se mueven de tal forma que las fuerzas que actúan sobre las partículas se anulan. Por lo tanto, el concepto de fuerza no necesita entrar en dinámica, y las trayectorias de las partículas se pueden interpretar como geodésicas cuyas propiedades vienen determinadas por las propiedades métricas del espacio-tiempo. Así, la gravedad tiene un origen puramente geométrico. La presencia de un campo gravitatorio modifica la estructura del espacio-tiempo. En la Teoría General de la Relatividad el espacio y el tiempo constituyen una estructura geométrica curvada en forma continua. La gravedad es una distorsión en la curvatura del espacio-tiempo.



La Teoría General de la Relatividad se resume en 14 ecuaciones: las ecuaciones de campo de Einstein y las ecuaciones de las geodésicas[3]. Utilizando las ecuaciones de campo, se puede determinar la métrica del espacio-tiempo para una distribución dada de materia o energía (el tensor métrico describe la desviación del teorema de Pitágoras en un espacio curvo). Partiendo de estas ecuaciones, se pueden hacer

toda una serie de predicciones extraordinarias como por ejemplo: el avance del perihelio del planeta Mercurio, la desviación de la luz debido al campo gravitacional del Sol, el corrimiento al rojo gravitacional, el retardo de las señales de radar reflejadas en un planeta o satélite, la existencia de ondas gravitacionales (perturbaciones del campo gravitacional que se propagan a la velocidad de la luz), las lentes gravitacionales, la expansión del universo, etc.. Sin embargo, una de las predicciones más notables, y a la que dedicaremos el presente artículo es la existencia de objetos con propiedades muy extrañas denominados agujeros negros. En particular analiza-remos lo que le sucedería a un observador al caer hacia el horizonte de sucesos de un agujero negro de Schwarzschild (un agujero negro esférico, sin carga eléctrica y desprovisto de movimiento de rotación).

2. Ecuaciones de campo de Einstein

La Teoría General de la Relatividad se resume en 14 ecuaciones. Las ecuaciones de campo de Einstein (que representan en total 10 ecuaciones escritas en forma tensorial)[2,3,4,5]:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} - \lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (2.1)$$

y la ecuación de las geodésicas (cuatro ecuaciones):

$$\frac{d^2 x^\mu}{ds^2} + \Gamma_{\rho\sigma}^\mu \left(\frac{dx^\rho}{ds} \right) \left(\frac{dx^\sigma}{ds} \right) = 0 \quad (2.2)$$

En (2.1) $R = g^{\alpha\beta} R_{\alpha\beta}$. A $R_{\mu\nu}$ se le denomina Tensor de Ricci, el cual se define a partir del Tensor de Riemann-Christoffel $\left(R_{\nu\rho\sigma}^\mu \right)$ que determina la curvatura del espacio-tiempo: $R_{\mu\nu} = R_{\mu\alpha\nu}^\alpha$ donde

$$R_{\nu\rho\sigma}^\mu = \frac{\partial}{\partial x^\rho} \left(\Gamma_{\nu\sigma}^\mu \right) - \frac{\partial}{\partial x^\sigma} \left(\Gamma_{\nu\rho}^\mu \right) + \Gamma_{\alpha\rho}^\mu \Gamma_{\nu\sigma}^\alpha - \Gamma_{\nu\rho}^\alpha \Gamma_{\alpha\sigma}^\mu \quad (2.3)$$

$g_{\mu\nu}$ es el tensor métrico; este tensor determina las propiedades métricas del espacio-tiempo. $T_{\mu\nu}$ es el tensor energía-cantidad de movimiento (toma en cuenta todos los campos de materia y radiación presentes). G es la constante de gravitación universal; su valor es $6.673 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2 / \text{Kg}^2$. La constante c es la velocidad de la luz (trescientos mil kilómetros por segundo). Finalmente λ es la constante cosmológica introducida por Einstein en 1917. Es una medida de la contribución a la densidad de energía del universo debido a las fluctuaciones del vacío. Originalmente, Einstein la introdujo para evitar la expansión del universo, ya que él

creía en un universo estático. Su valor es $|\lambda| < 3 \times 10^{-52} \text{ m}^{-2}$. El inverso de la raíz cuadrada del valor absoluto de la constante cosmológica mide la escala de distancia en la cual la geometría del espacio-tiempo es afectada por fluctuaciones del vacío; su valor coincide con el tamaño del universo visible: 10^{26} metros. En el marco de la Teoría General de la Relatividad la gravedad es una distorsión en la curvatura del espacio-tiempo.

En el marco de la Teoría General de la Relatividad la gravedad es una distorsión en la curvatura del espacio-tiempo. En (2.2) se representa el arco de curva, y satisface la relación

$$(ds)^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \quad (2.4)$$

$\Gamma_{\rho\sigma}^\mu$ son los símbolos de Christoffel de segunda especie

$$\Gamma_{\rho\sigma}^\mu = \frac{1}{2} g^{\mu\alpha} \left\{ \frac{\partial g_{\rho\alpha}}{\partial x^\sigma} + \frac{\partial g_{\sigma\alpha}}{\partial x^\rho} - \frac{\partial g_{\rho\sigma}}{\partial x^\alpha} \right\}$$

x^μ es el cuadvivector posición de la partícula. Las letras griegas como: μ, ν, ρ , etc. toman los valores 0, 1, 2 y 3. Hemos adoptado la convención de suma de Einstein en la que se suma sobre índices que se repiten dos veces. En coordenadas esféricas $x^0 = ct$, $x^1 = r$, $x^2 = \theta$ y $x^3 = \varphi$.

Nota: Las ecuaciones de campo (2.1) se pueden deducir a partir de la “Acción de Einstein-Hilbert”[5]:

$$S = \int d^4 x \sqrt{-g} [L_G - 2k L_F + 2\lambda] \quad (2.5)$$

donde $L_G \equiv R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$, L_F es el Lagrangiano de todos los otros campos de radiación o de materia., $g = \det(g_{ij})$, y $k = 8\pi G c^{-4}$.

El tensor energía-cantidad de movimiento $T_{\mu\nu}$ está relacionado con el lagrangiano L_F a través de la ecuación:

$$T_{\mu\nu} = \frac{2}{\sqrt{-g}} \left[\frac{\partial(\sqrt{-g} L_F)}{\partial g^{\mu\nu}} - \frac{\partial}{\partial x^\alpha} \left(\frac{\partial(\sqrt{-g} L_F)}{\partial \left(\frac{\partial g^{\mu\nu}}{\partial x^\alpha} \right)} \right) \right] \quad (2.6)$$

3. Métrica de Schwarzschild

Para un campo gravitacional estático con simetría esférica las ecuaciones de campo de la Teoría General

de la Relatividad nos conducen al intervalo invariante (métrica de Schwarzschild)[2,3,5]:

$$(ds)^2 = \gamma (cdt)^2 - \gamma^{-1} (dr)^2 - r^2 (d\theta)^2 - r^2 (\sin \theta d\phi)^2 \quad (3.1)$$

de manera que el tensor métrico covariante está dado por la matriz:

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} \gamma & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\gamma^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r^2 \sin^2 \theta \end{pmatrix}$$

y el tensor contravariante correspondiente es:

$$g^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} \gamma^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r^{-2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r^{-2} \sin^{-2} \theta \end{pmatrix}$$

donde $\gamma = 1 - \frac{2GM}{rc^2}$, M es la masa del objeto que genera

el campo gravitacional, r , θ y ϕ son las coordenadas esféricas de un punto alrededor de la distribución de masa y t es el tiempo coordenado. El intervalo invariante se puede escribir en términos del tiempo propio como $ds = cdt$. El tiempo propio representa el intervalo de tiempo medido por un observador inmerso en la región del campo gravitacional. En cambio, el tiempo coordenado, es el intervalo de tiempo medido por un observador muy alejado de la fuente o las fuentes del campo gravitacional.

La ecuación (3.1) presenta dos singularidades. La primera singularidad se da cuando $\gamma = 0$, es decir cuando el radio es igual al radio de Schwarzschild:

$$r = r_s = \frac{2GM}{c^2} \quad (3.2)$$

que define la frontera o el horizonte de sucesos para un agujero negro. Esta es una singularidad matemática pues puede ser removida mediante una conveniente transformación de coordenadas, como la introducida por Eddington en 1924 o Finkelstein en 1958[6]:

$$\tilde{t} = t \pm \frac{r_s}{c} \ln \left| \frac{r}{r_s} - 1 \right| \quad (3.3)$$

En efecto, con las transformaciones (3.3), el intervalo invariante se escribe

$$(ds)^2 = c^2 \left(1 - \frac{r_s}{r} \right) (d\tilde{t})^2 - \left(1 + \frac{r_s}{r} \right) (dr)^2 - 2c \frac{r_s}{r} d\tilde{t} dr - r^2 (d\Omega)^2 \quad (3.4)$$

donde $(d\Omega)^2 = (d\theta)^2 + \sin^2 \theta (d\phi)^2$ es el elemento de ángulo sólido elevado al cuadrado. La ecuación (3.4) no contiene más la singularidad en $r = r_s$. La otra singularidad se presenta en $r = 0$. En dicha singularidad, todas las leyes físicas conocidas fallan, y la curvatura del espacio-tiempo es infinita.

La primera transformación en (3.3) :

$$\tilde{t} = t + \frac{r_s}{c} \ln \left| \frac{r}{r_s} - 1 \right|$$

describe un agujero negro; mientras que la segunda:

$$\tilde{t} = t - \frac{r_s}{c} \ln \left| \frac{r}{r_s} - 1 \right|$$

representa lo que los físicos han denominado un “agujero blanco” emitiendo material a partir de una singularidad en $r = 0$ hacia el espacio-tiempo. No conocemos ningún proceso físico que pueda dar lugar a la formación de un objeto de estas características. La singularidad que diera origen al universo según el Modelo Standard de la Gran Explosión es un ejemplo de agujero blanco.

Si tenemos dos eventos que ocurren en un punto fijo del espacio, podemos escribir a partir de (3.1):

$$(d\tau)^2 = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2} \right) (dt)^2 \quad (3.5)$$

o, tomando hasta términos de primer orden en $2GM/rc^2$

$$(dt)^2 = \left(1 + \frac{2GM}{rc^2} \right) (d\tau)^2 \quad (3.6)$$

Esta última ecuación nos dice que, para un observador distante, los intervalos de tiempo están dilatados.

4. Ecuación de conservación de la energía

Consideremos una partícula de masa m que se mueve en un campo gravitacional (creado por una masa M) con simetría esférica en el plano $\theta = \pi/2$. Recordando que $ds = c d\tau$, la ecuación (3.1) se puede escribir en la forma (luego de multiplicar por m^2)

$$m^2 c^2 = \gamma m^2 c^2 \left(\frac{dt}{d\tau} \right)^2 - m^2 \gamma^{-1} \left(\frac{dr}{d\tau} \right)^2 - r^2 \left(\frac{d\varphi}{d\tau} \right)^2 m^2 \quad (4.1)$$

La ecuación de las geodésicas (2.2), se puede escribir para $\mu = 0$

$$\frac{d^2 x^0}{d\tau^2} + 2\Gamma_{01}^0 \left(\frac{dx^0}{d\tau} \right) \left(\frac{dx^1}{d\tau} \right) = 0 \quad (4.2)$$

donde $\Gamma_{01}^0 = \frac{1}{2\gamma} \left(\frac{d\gamma}{dr} \right)$, $x^0 = ct$ y $x^1 = r$.

Los demás símbolos de Christoffel son iguales a cero.

Como $\left(\frac{d\gamma}{dr} \right) \left(\frac{dr}{d\tau} \right) = \left(\frac{d\gamma}{d\tau} \right)$, (4.2) se reduce a:

$$\frac{d}{d\tau} \left(\gamma \frac{dt}{d\tau} \right) = 0 \quad (4.3)$$

de donde obtenemos

$$\gamma \left(\frac{dt}{d\tau} \right) = \text{constante} \quad (4.4)$$

Definiendo

$$E \equiv \gamma m c^2 \left(\frac{dt}{d\tau} \right) \quad (4.5)$$

vemos que en virtud de la ecuación (4.4), E es una constante. En el caso en el que el campo gravitacional es muy débil, $\gamma \approx 1$, y el lado derecho de la ecuación (4.5) se reduce a la expresión que nos da la energía de una partícula (energía en reposo + energía cinética) en el contexto de la Teoría Especial de la Relatividad.

Para $\mu = 3$, la ecuación de las geodésicas se reduce a

$$\frac{d^2 \varphi}{d\tau^2} + \frac{2}{r} \left(\frac{d\varphi}{d\tau} \right) \left(\frac{dr}{d\tau} \right) = 0 \quad (4.6)$$

donde hemos usado:

$$\Gamma_{13}^3 = \Gamma_{31}^3 = \frac{1}{r}; \Gamma_{23}^3 = \Gamma_{32}^3 = \cot\theta;$$

los demás símbolos de Christoffel son iguales a cero.

La ecuación (4.6) también se puede escribir:

$$\frac{d}{d\tau} \left(r^2 \frac{d\varphi}{d\tau} \right) = 0 \quad (4.7)$$

Si definimos

$$J \equiv r^2 \frac{d\varphi}{d\tau} \quad (4.8)$$

la ecuación (4.7) nos dice que J es una constante. Dicha constante J representa simplemente el momentum angular por unidad de masa de la partícula.

Introduciendo E en (4.1), podemos escribir:

$$\frac{1}{2} m \left(\frac{dr}{d\tau} \right)^2 + \frac{1}{2} \gamma m r^2 \left(\frac{d\varphi}{d\tau} \right)^2 - \frac{GmM}{r} = \quad (4.9)$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{E^2}{mc^2} - mc^2 \right) \equiv T = \text{constante}$$

y puesto que $\frac{dr}{d\tau} = \left(\frac{dr}{d\varphi} \right) \left(\frac{d\varphi}{d\tau} \right) = \frac{J}{r^2} \left(\frac{dr}{d\varphi} \right)$

se tiene también,

$$\frac{1}{2} \frac{mJ^2}{r^4} \left(\frac{dr}{d\varphi} \right)^2 + \frac{1}{2} \gamma m r^2 \left(\frac{J^2}{r^4} \right) - \frac{GmM}{r} = T \quad (4.10)$$

La ecuación (4.9) es el equivalente, en el espacio-tiempo de Schwarzschild, de la ecuación clásica de conservación de la energía.

5. Cayendo hacia un agujero negro de Schwarzschild

Supongamos que una sonda espacial tripulada de masa, m , cae desde el reposo (desde una distancia muy grande), en dirección hacia un agujero negro de Schwarzschild (un agujero negro esférico, sin carga eléctrica y desprovisto de movimiento de rotación). Si la nave se mueve en dirección radial, en el plano $\theta = \pi/2$, y si por simplicidad hacemos $\varphi = 0^\circ$ en la ecuación (4.9), puesto que $E = mc^2$, tenemos:

$$\frac{1}{2} m \left(\frac{dr}{d\tau} \right)^2 - \frac{GmM}{r} = 0 \quad (5.1)$$

donde M es la masa del agujero negro y τ es el tiempo propio medido por un observador a bordo de la nave. En términos del radio de Schwarzschild, r_s , la ecuación (5.1) se puede escribir

$$\left(\frac{dr}{d\tau}\right)^2 = c^2 \frac{r_s}{r} \quad (5.2)$$

Sacando la raíz cuadrada de la anterior expresión y haciendo separación de variables, obtenemos la siguiente integral:

$$\int_{\tau_0}^{\tau} d\tau = - \int_0^r \left(\frac{r}{r_s}\right)^{1/2} \frac{1}{c} dr$$

en la integral, hemos tomado un signo negativo al extraer la raíz cuadrada, debido a que el viaje es hacia el interior del agujero negro. τ_0 es el tiempo propio en el cual la sonda alcanza el centro del agujero negro. El resultado de la integración es:

$$\tau(r) = \tau_0 - \frac{2r}{3c} \left(\frac{r}{r_s}\right)^{1/2} \quad (5.3)$$

de manera que en el radio de Schwarzschild r_s tenemos,

$$\tau(r_s) = \tau_0 - \frac{2r_s}{3c}$$

de esta última relación podemos deducir que

$$\tau_0 - \tau(r_s) = \frac{4GM}{3c^3} \quad (5.4)$$

La ecuación (5.3) nos da el intervalo de tiempo, medido desde el horizonte de eventos, en el que la sonda alcanzaría el centro del agujero negro. Para un agujero negro con una masa igual a 10 veces la del Sol, la nave llegaría al centro del agujero negro en 6.6×10^{-5} segundos.

Veamos ahora como vería un observador muy alejado del horizonte de sucesos del agujero negro el descenso de la nave. Si partimos de la ecuación (4.5), con $E = mc^2$, (debido a que la nave cae a partir del reposo desde una distancia muy grande), podemos escribir:

$$\left(1 - \frac{r_s}{r}\right) dt = d\tau \quad (5.5)$$

a partir de (5.2) y (5.5) (tomando el signo negativo al extraer la raíz cuadrada) tenemos:

$$\begin{aligned} dr &= -c \left(\frac{r_s}{r}\right)^{1/2} \\ d\tau &= -c \left(\frac{r_s}{r}\right)^{1/2} \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) dt \end{aligned} \quad (5.6)$$

Haciendo separación de variables e integrando obtenemos:

$$t - t_0 = - \frac{1}{c r_s^{1/2}} \int_0^r \frac{r^{3/2}}{(r - r_s)} dr \quad (5.7)$$

que nos da

$$t = t_0 + \frac{r_s}{c} \left[\frac{-2 \left(\frac{r}{r_s}\right)^{3/2} - 2 \left(\frac{r}{r_s}\right)^{1/2} + \ln \left| \frac{\left(\frac{r}{r_s}\right)^{1/2} + 1}{\left(\frac{r}{r_s}\right)^{1/2} - 1} \right|}{1} \right] \quad (5.8)$$

donde t_0 es el tiempo, visto por un observador muy distante, que se demora la sonda en alcanzar el centro del agujero negro. En el límite cuando r se aproxima al radio de Schwarzschild (r_s), el tiempo se hace infinito. La ecuación (5.8) nos dice que para un observador muy distante, el viaje de la nave hacia el horizonte de sucesos del agujero negro duraría toda la eternidad.

Si, $r \gg r_s$,

$$\ln \left| \frac{\left(\frac{r}{r_s}\right)^{1/2} + 1}{\left(\frac{r}{r_s}\right)^{1/2} - 1} \right| \approx 2 \left(\frac{r_s}{r}\right)^{1/2}$$

que es muy pequeño, por lo que para grandes valores de r podemos escribir

$$t \approx t_0 - \frac{2}{3} \left(\frac{r_s}{c}\right) \left(\frac{r}{r_s}\right)^{3/2} - 2 \left(\frac{r_s}{c}\right) \left(\frac{r}{r_s}\right)^{1/2} \quad (5.9)$$

6. Órbita estable alrededor de un agujero negro de Schwarzschild

La ecuación correspondiente al arco de curva (2.4) se puede escribir de una forma más general (recordando que $ds = c d\tau$) como:

$$\kappa = g_{\mu\nu} \dot{x}^\mu \dot{x}^\nu \quad (6.1)$$

$$\kappa = \begin{cases} 1 & \text{parageodésicas cuasi-temporales} \\ 0 & \text{parageodésicas nulas (luz)} \\ -1 & \text{parageodésicas cuasi-espaciales} \end{cases}$$

$$\text{Donde } \dot{x}^\mu = \frac{dx^\mu}{d\tau}$$

(τ es el tiempo propio). A κ se le conoce con el nombre de parámetro afín. Trabajando en un sistema de unidades en el que c , G son iguales a uno (para facilitarnos los cálculos), la ecuación (6.1) es, para la métrica de Schwarzschild:

$$\kappa = \gamma \left(\dot{t} \right)^2 - \gamma^{-1} \left(\dot{r} \right)^2 - r^2 \left(\dot{\theta} \right)^2 - r^2 \sin^2 \theta \left(\dot{\phi} \right)^2 \quad (6.2)$$

donde el punto sobre t , r , θ y ϕ significa que estamos derivando con respecto al tiempo propio.

Usando

$$\varepsilon \equiv \frac{E}{m} = \gamma(\dot{t}), \quad J = r^2(\dot{\phi})$$

(ver ecuaciones (4.5) y (4.8)) y tomando $\theta = \pi/2$, la ecuación (6.2) nos conduce a:

$$(\dot{r})^2 = +\frac{1}{2} \left(1 - \frac{2M}{r} \right) \left(\kappa + \frac{J^2}{r^2} \right) = \frac{1}{2} \varepsilon^2 \quad (6.3)$$

que también se puede escribir:

$$\frac{1}{2} (\dot{r})^2 + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2M}{r} \right) \left(\kappa + \frac{J^2}{r^2} \right) = \frac{1}{2} \varepsilon^2 \quad (6.3a)$$

En esta última ecuación, podemos identificar al segundo término del lado izquierdo, como el potencial efectivo por unidad de masa (comparen dicha expresión con la ecuación clásica del movimiento radial de una partícula de masa unitaria y energía $\frac{1}{2} \varepsilon^2$):

$$V(r) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2M}{r} \right) \left(\kappa + \frac{J^2}{r^2} \right) = \frac{1}{2} \kappa - \frac{M}{r} \kappa + \frac{J^2}{2r^2} - \frac{MJ^2}{r^3} \quad (6.4)$$

donde $-\frac{M}{r} \kappa$ representa el término Newtoniano, $\frac{J^2}{2r^2}$

es el término centrífugo y $-\frac{MJ^2}{r^3}$ es un término adicional que domina sobre el término centrífugo para pequeños valores de r .

Para geodésicas nulas ($\kappa = 0$), el potencial es:

$$V(r) = \frac{J^2}{2r^2} - \frac{MJ^2}{r^3} \quad (6.5)$$

Esta función de potencial tiene un máximo en $r = 3M$, o restaurando G y c , en $r = \frac{3GM}{c^2}$, que corresponde a una órbita circular inestable de un rayo de luz alrededor del agujero negro.

Para geodésicas cuasi-temporales,

$$V(r) = \frac{1}{2} - \frac{M}{r} + \frac{J^2}{2r^2} - \frac{MJ^2}{r^3} \quad (6.6)$$

Donde (6.6) tiene un máximo en

$$r_1 = r_J \left[1 - \left(1 - 3 \frac{r_s}{r_J} \right)^{1/2} \right] \quad (6.7)$$

y un mínimo en

$$r_2 = r_J \left[1 + \left(1 - 3 \frac{r_s}{r_J} \right)^{1/2} \right] \quad (6.8)$$

donde $r_s = 2M$ y $r_J = J^2/r_s$. El valor más pequeño de r_2 se lo obtiene haciendo $r_J = 3r_s$ y es $r_{2\min} = 3r_s$. Es decir que la órbita circular estable más pequeña para una partícula alrededor de un agujero negro de Schwarzschild se encuentra a una distancia del centro del mismo igual a tres veces el radio de Schwarzschild. Reemplazando el valor de $r_{2\min}$ en (6.3a) con $\kappa = 1$, obtenemos para dicha órbita circular $\varepsilon^2 = 8/9$, por lo que $E = \left(\frac{8}{9} \right)^{1/2} mc^2$ (restaurando c^2).

La energía liberada cuando material formando un disco de acreción alrededor del agujero negro cae hacia la mencionada órbita es: $\left(1 - \left(\frac{8}{9} \right)^{1/2} \right) mc^2$, es decir aproximadamente el 5.72% de su energía en reposo.

Calculemos ahora la velocidad de una partícula de masa en reposo, m , en una órbita circular estable alrededor de un agujero negro de Schwarzschild. Para dicha órbita, la métrica (3.1) se puede escribir (suponiendo que el movimiento es en el plano $\theta = \pi/2$):

$$c^2 = \gamma c^2 \left(\frac{dt}{d\tau} \right)^2 - r^2 \left(\frac{d\phi}{d\tau} \right)^2 \quad (6.9)$$

Si en la ecuación (4.5) hacemos $E = \left(\frac{8}{9} \right)^{1/2} mc^2$,

obtenemos $\frac{dt}{d\tau} = \sqrt{2}$. Introduciendo dicho valor en (6.9)

y puesto que la velocidad de la partícula es $v = r \left(\frac{d\phi}{d\tau} \right)$,

obtenemos

$$v = \frac{c}{\sqrt{3}} \quad (6.10)$$

que es aproximadamente el 58% de la velocidad de la luz. El período orbital de la partícula medido por un observador local estacionario es

$$\tau = \frac{6\pi r_s}{v} = \frac{12\pi\sqrt{3}GM}{c^3} \quad (6.11)$$

donde M es la masa del agujero negro. Para un agujero negro supermasivo con una masa igual a mil millones de veces la masa del Sol, el radio de Schwarzschild sería aproximadamente igual a 19.66 veces la distancia entre la Tierra y el Sol. El radio de la órbita circular estable más pequeña alrededor de dicho agujero equivaldría a unas 58.98 veces la distancia entre la Tierra y el Sol con un período orbital de 3.71 días. El tiempo coordinado correspondiente (medido por un observador muy alejado del agujero negro) sería: $t = (\sqrt{2})\tau = 5.25$ días.

7. Ecuación de desviación de la geodésica

i) Derivada absoluta o intrínseca

La derivada absoluta o intrínseca de un vector contravariante A^α se define [7]:

$$\frac{\delta A^\alpha}{\delta \tau} \equiv A^\alpha_{;\beta} \frac{dx^\beta}{d\tau} = \left(\frac{\partial A^\alpha}{\partial x^\beta} + \Gamma^\alpha_{\beta\gamma} A^\gamma \right) \frac{dx^\beta}{d\tau} \quad (7.1)$$

Donde τ es el tiempo propio.

Por otro lado, la segunda derivada absoluta o intrínseca del vector contravariante A^α está dada por la expresión:

$$\begin{aligned} \frac{\delta^2 A^\alpha}{\delta \tau^2} &\equiv \frac{\delta}{\delta \tau} \left(\frac{\delta A^\alpha}{\delta \tau} \right) = \\ &\frac{d^2 A^\alpha}{d\tau^2} + \frac{\partial \Gamma^\alpha_{\beta\gamma}}{\partial x^\mu} \left(\frac{dx^\mu}{d\tau} \right) A^\gamma \left(\frac{dx^\beta}{d\tau} \right) + \\ &2\Gamma^\alpha_{\beta\gamma} \left(\frac{dA^\gamma}{d\tau} \right) \left(\frac{dx^\beta}{d\tau} \right) + \Gamma^\alpha_{\beta\gamma} A^\gamma \left(\frac{d^2 x^\beta}{d\tau^2} \right) \\ &+ \Gamma^\alpha_{\beta\gamma} \Gamma^\gamma_{\nu\rho} A^\rho \left(\frac{dx^\nu}{d\tau} \right) \left(\frac{dx^\beta}{d\tau} \right) \end{aligned} \quad (7.2)$$

ii) Ecuación de desviación de la geodésica

Consideremos un vector ξ^ν en el espacio tiempo que conecta dos puntos ubicados en dos geodésicas muy

próximas en x^ν y $x^\nu + \xi^\nu$. Para cada geodésica podemos escribir:

$$\frac{d^2 x^\nu}{d\tau^2} + \Gamma^\nu_{\lambda\rho}(x) \left(\frac{dx^\lambda}{d\tau} \right) \left(\frac{dx^\rho}{d\tau} \right) = 0 \quad (7.3)$$

$$\begin{aligned} &\frac{d^2 (x^\nu + \xi^\nu)}{d\tau^2} + \\ &\Gamma^\nu_{\lambda\rho}(x + \xi) \left(\frac{d(x + \xi)^\lambda}{d\tau} \right) \left(\frac{d(x + \xi)^\rho}{d\tau} \right) = 0 \end{aligned} \quad (7.4)$$

En primer orden en ξ^ν

$$\Gamma^\nu_{\lambda\rho}(x + \xi) = \Gamma^\nu_{\lambda\rho}(x) + \frac{\partial \Gamma^\nu_{\lambda\rho}}{\partial x^\sigma} \xi^\sigma \quad (7.5)$$

Introduciendo (7.5) en (7.4) tenemos en primer orden en ξ :

$$\begin{aligned} &\frac{d^2 x^\nu}{d\tau^2} + \frac{d^2 \xi^\nu}{d\tau^2} + \Gamma^\nu_{\lambda\rho}(x) \left(\frac{dx^\lambda}{d\tau} \right) \left(\frac{dx^\rho}{d\tau} \right) + \\ &2\Gamma^\nu_{\lambda\rho}(x) \left(\frac{dx^\lambda}{d\tau} \right) \left(\frac{d\xi^\rho}{d\tau} \right) \\ &+ \frac{\partial \Gamma^\nu_{\lambda\rho}}{\partial x^\sigma} \xi^\sigma \left(\frac{dx^\lambda}{d\tau} \right) \left(\frac{dx^\rho}{d\tau} \right) = 0 \end{aligned} \quad (7.6)$$

Restando (7.3) de (7.6)

$$\begin{aligned} &\frac{d^2 \xi^\nu}{d\tau^2} + 2\Gamma^\nu_{\lambda\rho}(x) \left(\frac{dx^\lambda}{d\tau} \right) \left(\frac{d\xi^\rho}{d\tau} \right) + \\ &\frac{\partial \Gamma^\nu_{\lambda\rho}}{\partial x^\sigma} \xi^\sigma \left(\frac{dx^\lambda}{d\tau} \right) \left(\frac{dx^\rho}{d\tau} \right) = 0 \end{aligned} \quad (7.7)$$

Usando la ecuación (7.2), reemplazando $A \rightarrow \xi$

$$\begin{aligned} &\frac{\delta^2 \xi^\nu}{\delta \tau^2} = \frac{d^2 \xi^\nu}{d\tau^2} + \frac{\partial \Gamma^\nu_{\beta\gamma}}{\partial x^\mu} \left(\frac{dx^\mu}{d\tau} \right) \xi^\gamma \left(\frac{dx^\beta}{d\tau} \right) + \\ &2\Gamma^\nu_{\lambda\rho} \left(\frac{d\xi^\rho}{d\tau} \right) \left(\frac{dx^\lambda}{d\tau} \right) + \Gamma^\nu_{\beta\gamma} \xi^\gamma \left(\frac{d^2 x^\beta}{d\tau^2} \right) + \\ &\Gamma^\nu_{\beta\gamma} \Gamma^\gamma_{\alpha\rho} \xi^\rho \left(\frac{dx^\alpha}{d\tau} \right) \left(\frac{dx^\beta}{d\tau} \right) \end{aligned} \quad (7.8)$$

Si en el segundo término del lado derecho de la ecuación (7.8) hacemos los siguientes cambios de índices: $\beta \rightarrow \lambda$, $\gamma \rightarrow \rho$ y $\mu \rightarrow \sigma$ e introducimos la ecuación (7.7) tenemos:

$$\begin{aligned} \frac{\delta^2 \xi^\nu}{\delta \tau^2} = & -\frac{\partial \Gamma_{\lambda\sigma}^\nu}{\partial x^\rho} \xi^\rho \left(\frac{dx^\lambda}{d\tau} \right) \left(\frac{dx^\sigma}{d\tau} \right) + \\ & \frac{\partial \Gamma_{\lambda\rho}^\nu}{\partial x^\sigma} \left(\frac{dx^\sigma}{d\tau} \right) \xi^\rho \left(\frac{dx^\lambda}{d\tau} \right) + \Gamma_{\beta\gamma}^\nu \xi^\gamma \left(\frac{d^2 x^\beta}{d\tau^2} \right) + \\ & \Gamma_{\beta\gamma}^\nu \Gamma_{\alpha\rho}^\gamma \xi^\rho \left(\frac{dx^\alpha}{d\tau} \right) \left(\frac{dx^\beta}{d\tau} \right) \end{aligned} \quad (7.9)$$

De la ecuación de la geodésica sabemos que

$$\frac{d^2 x^\beta}{d\tau^2} = -\Gamma_{\lambda\rho}^\beta \left(\frac{dx^\lambda}{d\tau} \right) \left(\frac{dx^\rho}{d\tau} \right)$$

por lo que (7.9) se puede escribir:

$$\frac{\delta^2 \xi^\nu}{\delta \tau^2} = \xi^\rho \left(\frac{dx^\lambda}{d\tau} \right) \left(\frac{dx^\sigma}{d\tau} \right) \left[\begin{aligned} & \frac{\partial \Gamma_{\lambda\rho}^\nu}{\partial x^\sigma} - \\ & \frac{\partial \Gamma_{\lambda\sigma}^\nu}{\partial x^\rho} - \\ & \Gamma_{\alpha\rho}^\nu \Gamma_{\lambda\sigma}^\alpha + \Gamma_{\alpha\sigma}^\nu \Gamma_{\lambda\rho}^\alpha \end{aligned} \right] \quad (7.10)$$

usando (2.3) obtenemos

$$\frac{\delta^2 \xi^\nu}{\delta \tau^2} = \xi^\rho \left(\frac{dx^\lambda}{d\tau} \right) \left(\frac{dx^\sigma}{d\tau} \right) R_{\lambda\sigma\rho}^\nu \quad (7.11)$$

como $R_{\lambda\sigma\rho}^\nu = -R_{\lambda\rho\sigma}^\nu$, y si en (7.11) cambiamos $\gamma \rightarrow \beta$, $\rho \rightarrow \gamma$ y $\sigma \rightarrow \mu$ obtenemos finalmente

$$\frac{\delta^2 \xi^\nu}{\delta \tau^2} + R_{\beta\gamma\mu}^\nu \xi^\gamma \frac{dx^\beta}{d\tau} \frac{dx^\mu}{d\tau} = 0 \quad (7.12)$$

A (7.12) se le conoce como ecuación de desviación de la geodésica. $R_{\beta\gamma\mu}^\nu$ es el tensor de Riemann-Christoffel de segunda especie. La expresión (7.12) nos da la aceleración relativa entre dos partículas moviéndose a lo largo de geodésicas próximas.

Consideremos un observador que caiga libremente desde el reposo, en dirección radial, hacia el horizonte de

sucesos de un agujero negro de Schwarzschild. Si caería desde un punto muy alejado con respecto a dicho agujero, entonces, la aceleración relativa de dos puntos del viajero (por ejemplo la rodilla y el corazón) se podría determinar usando la ecuación de desviación de la geodésica. Puesto que nosotros estamos interesados únicamente en la componente tangencial, podemos escribir:

$$\frac{\delta^2 \xi^2}{\delta \tau^2} + R_{020}^2 \xi^2 c^2 \left(\frac{dt}{d\tau} \right)^2 + R_{121}^2 \xi^2 \left(\frac{dr}{d\tau} \right)^2 = 0 \quad (7.13)$$

donde

$$R_{020}^2 = \frac{\gamma r_s}{2r^3} \quad \text{y} \quad R_{121}^2 = -\frac{r_s}{2r^3 \gamma} \quad \text{y}$$

$$\gamma = 1 - \frac{2GM}{rc^2}$$

Usando la ecuación (4.5) con $E = mc^2$ tenemos:

$$\left(\frac{dt}{d\tau} \right) = \frac{1}{\gamma} \quad (7.14)$$

adicionalmente, la ecuación (4.9) se puede escribir

$$\left(\frac{dr}{d\tau} \right)^2 = \frac{2GM}{r} \quad (7.15)$$

de manera que la aceleración de marea es:

$$Q \equiv \frac{\left(\frac{\delta^2 \xi^2}{\delta \tau^2} \right)}{\xi^2} = -\frac{GM}{r^3} \quad (7.16)$$

Para un agujero negro con $M = 10 M_\odot$, a una distancia $r = 1000$ Km del centro del agujero negro, tendríamos

$$Q = -1327.3 \frac{m/s^2}{m}$$

Esto significa que la aceleración relativa de dos puntos de un viajero separados una distancia de un metro sería de $-1327.3 m/s^2$. Esta aceleración, es tan grande, que lo terminaría triturando.

8. Evaporación de un agujero negro

Al introducir la mecánica cuántica en la teoría de los agujeros negros, la entropía finita de un agujero negro, implica que dichos agujeros pueden crear y emitir partículas, antipartículas y radiación.

La temperatura de la radiación emitida por un agujero negro se puede estimar a partir del principio de incertidumbre de Heisenberg [6]. Consideremos un agujero negro de Schwarzschild (un agujero negro

esférico, desprovisto tanto de carga eléctrica como de movimiento de rotación). La posición de un fotón emitido desde la superficie del horizonte de sucesos del agujero negro tiene una incertidumbre del orden de $2\pi r_0$, donde $r_0 = 2GM/c^2$ es el radio de Schwarzschild. La incertidumbre en la cantidad de movimiento del fotón es

$$\Delta p \approx \frac{\hbar}{4\pi r_0} = \frac{\hbar c^2}{8\pi G M} \quad (8.1)$$

donde $\hbar = \frac{h}{2\pi}$.

$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$ es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz, G es la constante de gravitación universal y M es la masa del agujero negro. La energía media debido a agitación térmica es $E \approx K_B T \approx \Delta p c$ (donde $K_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$ es la constante de Boltzmann). Por lo tanto

$$\Delta p \approx \frac{K_B T}{c} \quad (8.2)$$

De la ecuaciones (8.1) y (8.2) obtenemos

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi K_B G M} \quad (8.3)$$

El cálculo exacto desarrollado por Stephen Hawking [8] produce el mismo resultado.

Introduciendo los valores de las constantes: $\hbar$, c , K_B , G en (8.3) obtenemos:

$$T = 6.1918 \times 10^{-8} \left(\frac{M_\odot}{M} \right) ^\circ\text{K} \quad (8.4)$$

donde $M_\odot$ es la masa del Sol. Para un agujero negro con una masa $M = 10^{11} \text{ kg}$ (cien millones de toneladas) la temperatura de la radiación emitida es $T = 1.23 \times 10^{12} ^\circ\text{K}$ (un billón de grados Kelvin). Por otro lado, si la masa del agujero negro es $M = 10^{12} \text{ kg}$ (mil millones de toneladas), la temperatura de la radiación emitida sería $T = 1.23 \times 10^{11} ^\circ\text{K}$ (cien mil millones de grados Kelvin).

La rapidez a la cual el agujero negro pierde energía por radiación Hawking es:

$$\frac{dE}{dt} = -\sigma A T^4 = -3.601 \times 10^{32} M^{-2} \frac{\text{Joules}}{\text{segundo}} \quad (8.5)$$

Donde E representa la energía, t es el tiempo, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2\text{K}$ es la constante de Stefan-

Boltzmann, A es el área del horizonte de sucesos del agujero negro y T es la temperatura de la radiación emitida (ecuación (8.4)).

Las ecuaciones (8.4) y (8.5) nos dicen que pequeños agujeros negros tienen mayores temperaturas y radian su energía más rápidamente que agujeros negros de gran masa. En un agujero negro con una masa de 10^{12} kg (mil millones de toneladas), el ritmo de radiación de energía sería de 360.1 Megawatts. Si la masa del agujero negro es 10^{11} kg (cien millones de toneladas), el ritmo de radiación de energía sería 36010 Megawatts. En comparación, una gran central de energía nuclear, genera unos 1000 Megawatts de potencia.

El tiempo de vida de un agujero negro (τ), es decir el tiempo en el cual el agujero negro se habrá evaporado, se puede calcular integrando la ecuación (8.5). El resultado es:

$$\tau = \left(\frac{M}{1.08 \times 10^{11} \text{ kilogramos}} \right)^3 \times 10^{10} \text{ años} \quad (8.6)$$

Por ejemplo, un agujero negro primario (agujeros formados no por el colapso de estrellas, sino por el colapso de regiones fuertemente comprimidas en el medio denso y caliente que existió después de la Gran Explosión) con una masa $M = 10^{11} \text{ kg}$ se habrá evaporado aproximadamente en 10^{10} años. Esta es más o menos la edad del universo, por lo que deberíamos ser capaces de observar la explosión de agujeros negros primarios hoy en día. Un agujero negro supermasivo se evaporaría en 10^{95} años.

La entropía de un agujero negro está dada por la ecuación de Stephen Hawking y Jacob Bekenstein [9]:

$$S = \frac{A c^3}{4 G \hbar} \quad (8.7)$$

donde A es el área de la superficie del horizonte de sucesos del agujero negro.

9. Agujeros negros cuánticos y aceleradores de partículas

Clásicamente, la masa del agujero negro más ligero que podría formarse se la puede obtener comparando su longitud de onda de Compton con su respectivo radio de Schwarzschild. La aplicabilidad de la Teoría General de la Relatividad exige que:

$$\lambda_{\text{Compton}} < r_s$$

es decir,

$$\frac{\hbar}{M c} < \frac{G M}{c^2} \quad (9.1)$$

donde M es la masa del objeto que colapsa. A partir de (9.1) podemos deducir

$$M > \left(\frac{\hbar c}{G} \right)^{1/2} = M_{Pl} \quad (9.2)$$

Donde M_{Pl} es la masa de Planck. $M_{Pl} = 1.22 \times 10^{19} \text{ GeV} / c^2 \approx 2.2 \times 10^{-8} \text{ kg}$.

En gravedad cuántica, el principio de incertidumbre de la mecánica cuántica se puede escribir[10]:

$$\Delta x_i \geq \frac{\hbar}{2\Delta p_i} \left[1 + \left(\alpha' l_{Pl} \frac{\Delta p_i}{\hbar} \right)^2 \right] \quad (9.3)$$

Donde Δx_i es la incertidumbre en la posición de la partícula en las direcciones x, y, z para $i = 1, 2$ y 3 , respectivamente. Δp_i es la incertidumbre en las cantidades de movimiento correspondientes,

$$l_{Pl} = \left(\frac{G\hbar}{c^3} \right)^{1/2} \approx 1.61 \times 10^{-35}. \quad m \text{ es la longitud de}$$

Planck, y finalmente α' es una constante sin dimensiones del orden de 1 que depende de los detalles de la teoría. Esta ecuación se puede derivar ya sea usando teoría de cuerdas, mecánica cuántica no conmutativa o consideraciones de longitud mínima.

Si despreciamos la longitud de Planck en la ecuación (9.3), obtenemos la relación habitual del principio de incertidumbre: $\Delta x_i \Delta p_i \geq \hbar/2$. Derivando (9.3) con respecto a Δp_i obtenemos que $\Delta p_{i \text{ mínimo}} = \hbar/(\alpha' l_{Pl})$, de manera que el valor mínimo de Δx_i es $\Delta x_{i \text{ mínimo}} = \alpha' l_{Pl}$. Por lo tanto, la ecuación (9.3) implica una escala de longitud mínima

$$\Delta x_i \geq \Delta x_{i \text{ mínimo}} = \alpha' l_{Pl} \quad (9.4)$$

Este principio de incertidumbre modificado conduce a nuevas expresiones para la temperatura de la radiación emitida por un agujero negro y su tiempo de evaporación. Para un agujero negro de Schwarzschild en d dimensiones del espacio-tiempo, el radio de Schwarzschild correspondiente es:

$$r_s = \omega_d l_{Pl} \left(\frac{M}{M_{Pl}^*} \right)^{1/(d-3)} \quad (9.5)$$

Donde M es la masa del agujero negro cuántico y ω_d está dado por la siguiente expresión:

$$\omega_d = \left[16\pi / \left[(d-2) \Omega_{d-2} \right] \right]^{1/(d-3)}$$

en la que Ω_{d-2} es el área de la hipersuperficie S^{d-2} . El principio de incertidumbre generalizado para un agujero negro de estas características es:

$$\Delta p = \left(2\hbar / \Delta x \right) \left[1 + \left(4l_{Pl}^2 \alpha'^2 / (\Delta x)^2 \right) \right]^{1/2} \quad (9.6)$$

Donde $\Delta x = 2Kr_s$ es la incertidumbre en la determinación de la posición de una partícula sin masa emitida desde el horizonte de sucesos del agujero negro, de Δp es la incertidumbre en el momento correspondiente, K es un factor de corrección de orden 1 que puede ser calculado a partir de la geometría esférica del horizonte de sucesos del agujero negro. Usando (9.6), se puede calcular la temperatura de la radiación emitida por el agujero negro:

$$T = 2T_0 \left[1 + \left[1 - \frac{\alpha^2}{\omega_d^2 m^{2/(d-3)}} \right]^{1/2} \right]^{-1} \quad (9.7)$$

donde

$$T_0 = \left(\frac{d-3}{4\pi\omega_d} \right) M_{Pl}^* c^2 m^{1/(3-d)}, m \equiv M / M_{Pl}^*,$$

$\alpha = \alpha' / K$ es un factor adimensional de orden 1 y M_{Pl}^* es la escala de masa de Planck que en teorías con dimensiones adicionales suficientemente largas es del orden de 1 TeV .

Como resultado, la masa mínima que puede tener un agujero negro cuántico es [10]:

$$M_m = \frac{(d-2)}{8\Gamma((d-1)/2)} (\alpha\sqrt{\pi})^{d-3} M_{Pl}^* \quad (9.8)$$

Donde Γ es la función Gamma:

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty e^{-x} x^{z-1} dx \quad (\text{Re}(z) > 0)$$

Así para $d = 10$ y $\alpha \approx 1$, la masa mínima sería $M_m = 4.72 \text{ TeV}$. Dicho agujero negro tendría un radio de 10^{-19} metros y se evaporaría en 10^{-26} segundos. Un agujero negro de estas características podría ser observado en el LHC en el que la energía total disponible en el centro de masa para las colisiones entre los protones es de 14 TeV . Por otro lado, si $d = 10$ y $\alpha \approx 2$, entonces la masa mínima sería $M_m = 604.16 \text{ TeV}$. En este caso, no se podría observar absolutamente nada en el LHC.

10. Conclusiones

Una de las más importantes y fascinantes predicciones de la Teoría General de la Relatividad es la existencia de agujeros negros.

En este artículo, hemos analizado lo que le sucedería a un observador al caer hacia el horizonte de sucesos de un agujero negro de Schwarzschild. Calculamos la órbita circular estable más pequeña alrededor de dichos agujeros. Hemos estudiado la evaporación de los agujeros negros y la posible producción de agujeros negros cuánticos en aceleradores de partículas como el LHC.

A continuación hacemos un breve resumen de los resultados obtenidos:

Si una nave espacial cayera en el interior de un agujero negro formado por el colapso gravitacional de una estrella con una masa igual a 10 veces la del Sol, los viajeros a bordo de la nave notarían que después de atravesar el horizonte de sucesos, la nave alcanzaría el centro del agujero negro en un intervalo de tiempo muy corto: $4GM / 3c^3 = 6.6 \times 10^{-5}$ segundos (casi siete cienmilésimas de segundo), esto suponiendo que cae a partir del reposo desde una gran distancia con respecto al agujero negro. Sin embargo, para un observador muy alejado de éste, el viaje a través del horizonte de sucesos de la nave espacial se demoraría toda la eternidad. El horizonte de sucesos de un agujero negro de Schwarzschild, representa, una superficie en la que el corrimiento hacia el rojo medido por un observador distante es infinito. En la práctica, sería imposible sobrevivir a tal viaje, pues la nave y sus ocupantes serían destruidos por el inmenso campo gravitacional del agujero negro. En efecto, la aceleración relativa de las partes del cuerpo de un viajero en caída libre hacia un agujero negro con las características descritas se puede calcular a partir de la ecuación de desviación de la geodésica. De acuerdo con esta ecuación, a una distancia de 1000 km del centro del agujero negro, dos puntos del viajero ubicados a una distancia de un metro (por ejemplo, una rodilla y el corazón) experimentarían una aceleración relativa de 1327.3 m/seg^2 debido a las mareas gravitacionales. Esta aceleración es tan grande, que lo terminaría triturando (comparen con el valor de la aceleración de la gravedad en el Ecuador: 9.8 m/seg^2). Como el radio de Schwarzschild del agujero negro es 30 km, el observador en caída libre, ni siquiera podría alcanzar con vida el horizonte de sucesos del agujero negro.

El radio de la órbita circular estable más pequeña alrededor de un agujero negro es tres veces el tamaño de su correspondiente radio de Schwarzschild. La energía liberada cuando material formando un disco de acreción alrededor del agujero negro cae hacia la mencionada órbita es aproximadamente el 5.72% de su energía en reposo. En comparación, la máxima energía liberada cuando el hidrógeno se quema en ${}^{56}\text{Fe}$ por fusión

termonuclear, es 0.9% de su energía en reposo. Por lo tanto, la energía gravitacional liberada cuando material cae hacia la órbita circular estable más pequeña, es la más importante fuente de energía en los procesos estelares. En dicha órbita estable las partículas se mueven con una velocidad igual al 58% de la velocidad de la luz. Cuando nosotros tenemos un agujero negro en rotación, la energía liberada puede ser mucho mayor, alcanzando hasta un 42% de la energía en reposo en condiciones favorables [6]. Vale la pena mencionar que en un agujero negro provisto de movimiento de rotación, puede existir más de una superficie con corrimiento hacia el rojo infinito, así como también varios horizontes de sucesos.

Al introducir la mecánica cuántica, la entropía finita del agujero negro, implica que un agujero negro crea y emite partículas, antipartículas y radiación. Debido a un efecto muy similar al efecto túnel de la mecánica cuántica, un agujero negro podría evaporarse emitiendo radiación. Un agujero negro primario con una masa de cien millones de toneladas tardaría en evaporarse unos diez mil millones de años, que es aproximadamente la edad del universo. A un agujero negro formado por el colapso de una estrella le esperaría un destino similar, aunque tardaría en evaporarse mucho más: 10^{68} años o más. Un agujero negro supermasivo se evaporaría en 10^{95} años.

En teorías con dimensiones adicionales del espacio suficientemente largas (como la teoría de cuerdas y supercuerdas y teorías de Kaluza Klein), la producción de agujeros negros cuánticos en aceleradores de partículas como el LHC sería perfectamente factible. Dichos agujeros tendrían masas en reposo del orden de unos pocos TeV, con un radio de 10^{-19} metros, aproximadamente. Tardarían en evaporarse unos 10^{-26} segundos. Debido a su efímera existencia, aparecerían en los detectores de partículas como brevísimos destellos de radiación. El descubrimiento de agujeros negros con estas características abriría nuevas fronteras en la física, que nos permitirían entender, con mayor claridad, la estructura del universo, sobre todo a escala microscópica.

Referencias bibliográficas

1. Hawking, S.W. 1988. Historia del Tiempo. Círculo de Lectores (Título original, A Brief History of Time. Bantam Books. NY, NY).
2. Schutz, B.F. 2005. A first course in general relativity, seventeenth printing, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
3. (a) Ohanian, H.C. 1976. Gravitation and Spacetime, Vol. 160. W.W. Norton & Company, Inc. NY, NY.
(b) Misner, C.W.; Thorne, K.S. and J. Wheeler, J.A. 1973. Gravitation, W. H. Freeman & Company. NY, NY.
(c) Weinberg, S. 1973. Gravitation and Cosmology, John Wiley & Sons, Inc. NY, NY.

4. Particle Data Group. 2004, 2006. Particle Physics Booklet.
5. 't Hooft, G. 2001. Introduction to General Relativity, Rinton Press Inc., Princeton, NJ.
6. Kenyon, I.R. 1996. General Relativity, Oxford University Press, Oxford, UK.
7. Sokolnikoff, I.S. 1979. Análisis Tensorial, segunda edición, INDEX, Madrid- Barcelona. Spain.
8. (a) Hawking, S.W. 1975. Particle Creation by Black Holes, *Commun. Math Phys.*, 43, 199-220.
(b) Hawking, S.W. and Penrose, R. 1996. The Nature of Space and Time, Princeton University Press, Princeton, NJ.
9. Horowitz, G.T. and Teukolsky, S.A. 1999. Black Holes. *Rev. Mod. Phys.* 71, S180.
10. (a) Carr, B.J. and Giddings, S.B. 2005. Quantum Black Holes. *Scientific American*, May. p.48-55.
(b) Cavaglia, M.; Das, S. and Maartens, R. 2003. Will we observe black holes at the LHC? *Classical and Quantum Gravity*. 20, 15. L205-L212.
(c) Arkani-Hamed N., Dimopoulos S., Dvali G. 2002. Large extra dimensions: a new arena for particle physics, *Physics Today*, February. p.35-40.

RESÚMENES DE PROYECTOS FINALES

DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA COMUNICACIÓN VIBRATORIA EN LA ESPECIE *clothoda longicauda* (Embióptera:clothodidae).

Carolina Proaño Serrano

Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales, USFQ.

Resumen

El estudio científico de la comunicación animal es un componente importantísimo para proveer de ases para la interacción social, ecológica y evolutiva de los insectos. En esta investigación, realizada en el Laboratorio de Ecología y Comportamiento de la USFQ, se desarrolló una metodología práctica para el estudio de la comunicación vibratoria de la especie *Clothoda longicauda* del orden Embióptera. Esta metodología se basó en el registro de señales vibratorias con un sensor piezoeléctrico conectado a un amplificador y este a un parlante o posteriormente a una grabadora. Para la validación de la metodología se realizó un sistema de tratamientos que permitió la interacción Residente Vs. Intruso, utilizando variados tipos de intrusos a los domicilios de seda construidos por hembras residentes. De esta manera se promovió la producción de respuestas comunicativas vibratorias. Se detectaron tres tipos diferentes de señales vibratorias, cada una de las cuales tiene características físicas específicas y una función al parecer diferente. Estos resultados son un aporte a la metodología del estudio comportamental de un orden de insectos muy poco estudiado, como lo es el orden Embióptera.

Palabras Clave. Comunicación vibratoria, Embídidos, comportamiento

Resumen del proyecto final

La comunicación vibratoria es extensa en la interacción social y ecológica de los insectos. Se estima que el 92% de las especies utilizan solo este tipo de comunicación o en combinación con otro tipo de señales de comunicación, siendo estas estimaciones muy conservadoras [1]. Las señales vibratorias difieren en gran medida de las señales auditivas, teniendo comúnmente frecuencias muy bajas y tonos puros que pueden combinarse con la utilización de elementos acústicos. El sustrato más utilizado por insectos para transmitir señales vibratorias son las plantas, sin embargo la utilización de capas de seda como sustrato también ha sido reportada aunque no ha sido muy estudiada [1]. Debido a nuestra capacidad visual y auditiva y a nuestra débil percepción vibratoria, solo recientemente los humanos hemos desarrollado métodos para obtener información sobre las vibraciones que se producen en nuestro alrededor [1]. En los últimos 30 años, sofisticadas tecnologías como los geófonos, utilizados para escuchar pisadas de enemigos en Vietnam, han permitido a los científicos responder preguntas sobre cómo los animales emiten y reciben señales. Ahora sabemos que las señales vibratorias a partir de un sustrato, son enviadas en una variedad de contextos a lo largo de la taxonomía animal [2] y podemos detectar y medir estas señales con equipos muy sensibles.

El orden Embioptera es parte de un grupo de órdenes de insectos llamados Polyneoptera que incluyen al orden Plecoptera, Orthoptera, Dermaptera y Phasmida. Los Embiópteros poseen una distribución primordialmente tropical, aunque algunas especies se encuen-

tran en climas cálidos templados y algunos incluso en elevaciones altas como bosques nublados y han sido muy poco estudiados [3]. Algunas de las pocas especies descritas incluyen a *Clothoda longicauda*, una especie que se sabe construye domicilios de seda crípticos [3], y posee uno de los mayores tamaños comparado con otras especies de este grupo de insectos, haciendo que sea un buen sujeto de estudio por su mayor facilidad de observación y detección.

Se cree que los Embiópteros pueden ser capaces de utilizar la comunicación vibratoria por su similitud y parentesco evolutivo con otras especies de insectos que sí lo hacen (Cocroft, 2005). La utilización de capas de seda como sustrato en la transmisión de vibraciones, extremadamente probable en este grupo dadas sus características, es desconocida, como también cualquier otro tipo de comunicación. En este contexto, en esta investigación se buscó desarrollar un método efectivo de detección de señales vibratorias. Este método fue validado con la obtención de algunos resultados preliminares para determinar la presencia de señales vibratorias.

En el año 2007, en el Laboratorio de Ecología y Comportamiento de la USFQ se estudió a 5 hembras adultas de la especie *Clothoda longicauda* y con ellas se desarrolló una metodología práctica para el estudio de la comunicación vibratoria. Esta metodología se basó en el registro de señales vibratorias con un sensor piezoeléctrico conectado a un amplificador y este a un parlante o posteriormente a una grabadora. Para la validación de la metodología se realizó un sistema de tratamientos que permitió la interacción Residente Vs. Intruso, utilizando variados tipos de intrusos a los domicilios de seda construidos por

hembras residentes. De esta manera se promovió la producción de respuestas comunicativas vibratorias.

Se detectaron tres tipos diferentes de señales vibratorias, cada una de las cuales tiene características físicas específicas y una función al parecer diferente. La primera señal fue denominada “Alarma”, por ser particularmente marcada en el espectro y auditivamente fuerte; la hembra que emite esta señal realiza un movimiento hacia adelante y atrás muy evidente y rápido. La segunda señal se la denominó “Correr Atrás” porque el individuo emisor realiza un movimiento muy rápido en reversa, haciendo que esta señal sea muy marcada en el espectro pero muy corta en duración. La tercera señal es “Levantar Seda”; la emisión de esta señal es visualmente notoria porque la hembra alza con su cabeza la capa de seda emitiendo una vibración que se puede observar en el espectro siendo corta pero sostenida. Con estos resultados se pretende aportar con bases para la realización de nuevos estudios dentro de esta área, que contribuyan al entendimiento de las características y evolución de este tipo de comunicación en insectos.

Referencias bibliográficas

1. Cocroft, R.B; Rodríguez R.L. 2005. The Behavioral Ecology of Insect Vibrational Communication. American Institute of Biological Science. 55: 323-334.
2. Markl, H. 1983. Vibrational communication. En: Neuroethology and behavioral physiology. F. Huber and H. Markl (eds.). Springer-Verlag, Berlin. pp. 332–353.
3. Edgerly, J.S.; Davilla, J.A; Schoenfeld, N. 2002 Silk spinning behaviour and domicile construction in webspinners. Insect Behaviour 15: 219-242.

DISEÑO ESTRATÉGICO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN PARA EL PROYECTO DE EMPRESA FOOD SERVICE S.A.

Daniel E. Merchán D.

Colegio de Ciencias e Ingeniería, USFQ.

Resumen

Se presenta una propuesta de diseño estratégico del sistema de distribución de una empresa en planes de creación que busca convertirse en un intermediario entre los operadores de alimentos y bebidas y sus proveedores, en el Distrito Metropolitano de Quito. En ésta fase de diseño se establecen las bases operativas a largo plazo sobre las cuales se deberá diseñar y planificar la operación del negocio a corto y mediano plazo.

El estudio se concentra en establecer los lineamientos operativos de cada uno de los cuatro componentes de un sistema de distribución, a saber: inventario, transporte, sistemas de información y almacenamiento, y manejo de materiales. El mayor esfuerzo de investigación y desarrollo se destinó al sistema de información por considerarlo el eje de los demás componentes. Se incluye también un análisis de la ubicación más adecuada para el centro de operaciones de esta nueva compañía así como un diseño de su estructura de procesos internos.

Palabras Clave. Logística; Sistema de distribución; Iniciativa de Respuesta de Servicio de Alimentos Eficiente; Centro de distribución; e-Business.

Introducción

Las prácticas logísticas de los negocios de alimentos y bebidas en el Distrito Metropolitano de Quito y, en particular, sus procesos de abastecimiento presentan actualmente bajos niveles de eficiencia con importante impacto en costos operativos y administrativos. Entre las potenciales causas de dicha ineficiencia se puede señalar: limitado traspaso de información entre clientes y proveedores, falta de coordinación, limitado uso de la tecnología, e informalidad de las partes. A esto se suma el hecho de que, por sí mismo, el proceso de compras en un establecimiento de hospitalidad es complejo, dada la gran cantidad de productos y el elevado número de proveedores que la situación del negocio actualmente exige[1].

Si bien los administradores de negocios de alimentos y bebidas destinan hoy en día relativamente poco tiempo a la selección y abastecimiento de los productos que necesitan, ésta es una actividad crítica dentro de las operaciones de un negocio de este estilo. Las estadísticas dicen que, en Norteamérica, uno de cada tres restaurantes cierra en su primer año de operación. A pesar de que la ubicación es aún considerada el principal vaticinador del éxito, contar con una apropiada selección y abastecimiento de productos es también fundamental [2].

Por lo tanto, la gestión de aprovisionamiento existente en la industria deja abierta la posibilidad de crear un negocio que se encargue de tales actividades, con mayor formalidad y mejores estándares de eficiencia logística y administrativa. *Food Service S.A.* es un proyecto de empresa que busca llenar esa necesidad del mercado

cuyo objetivo es convertirse en un intermediario entre operadores de alimentos y bebidas y sus proveedores.

Este resumen se enfoca en la primera etapa del diseño de las operaciones de este nuevo negocio; es decir, en el diseño estratégico que busca establecer los lineamientos operativos a largo plazo, y que serán la base para los diseños posteriores más específicos y de menor proyección temporal. El estudio se limita al plano operativo y no incluye consideraciones comerciales, financieras ni de mercadeo. Dichos aspectos se encuentran bajo análisis en un estudio en proceso.

El artículo ha sido organizado de la siguiente manera. En la primera parte se propone una estructura de procesos interna de la nueva empresa a diferentes niveles. Segundo, se realiza un análisis sobre la ubicación más apropiada para el centro de operaciones de la compañía en cuestión. En la tercera parte se diseña del sistema de distribución, compuesto de cuatro elementos principales: manejo de inventario, transporte, manejo y almacenamiento de productos, y el sistema de información. De estos elementos, se destina el mayor esfuerzo de diseño al sistema de información, pues se lo considera el eje del sistema de distribución. Finalmente, se emiten conclusiones sobre el estudio y se efectúan algunas sugerencias relacionadas.

El artículo sintetiza los elementos más importantes de la propuesta de diseño. Para mayor nivel de detalle de los temas aquí expuestos, así como para consideraciones adicionales como costos e infraestructura, se puede consultar la tesis de pregrado del autor en la Universidad San Francisco de Quito.

Desarrollo

Diseño de procesos internos

Por razones de eficiencia organizacional, se sugiere que, desde un inicio, *Food Service* oriente sus operaciones bajo los lineamientos de la administración por procesos, es decir, integrar horizontalmente las actividades de la organización sobrepasando las estructuras funcionales tradicionales. Para tal propósito, es necesaria una estructuración de procesos en base a los siguientes tres niveles: estratégico, productivo y habilitante.

Nivel Estratégico. Engloba los procesos responsables de establecer los lineamientos estratégicos del negocio. Entre ellos: planeación estratégica y financiera, mejoramiento continuo, investigación de mercados.

Nivel Productivo. Transforman el requerimiento del cliente en una orden completa y entregada. Estos procesos son los de mayor impacto en los niveles de satisfacción del cliente. Los principales son: planeación de órdenes, cumplimiento de orden, distribución, venta y servicio al cliente.

Nivel de Soporte. Todos los procesos necesarios para lograr que aquellos de los niveles productivo y estratégico puedan ser ejecutados. Entre los principales se puede mencionar: aprovisionamiento, mercadeo y contabilidad.

Localización Del Centro De Distribución

Un centro de distribución (CD) es el eslabón de la cadena de demanda destinado habitualmente a la repartición de una o más cargas provenientes de una o varias plantas productoras, y a su consolidación en pedidos de diversos tamaños e integración para clientes comerciales [3]. En otras palabras, un CD es el eje de la distribución en un sistema logístico y, por lo tanto, su ubicación debe ser estratégicamente definida. En este caso, *Food Service* requiere un CD ubicado lo más cerca posible de sus clientes a fin de poder responder ágil y rápidamente a sus requerimientos.

En este estudio se implementó un modelo analítico para determinar la ubicación geográfica adecuada para el centro de distribución. Este modelo, denominado Rectilíneo-Minisum, permite minimizar la distancia entre el punto de abastecimiento y los de demanda, con mediciones de distancia basadas en tramos perpendiculares. Por su forma de medir distancias, el modelo es especialmente útil para aplicaciones urbanas. El resultado fue validado con el uso de otro modelo distinto, el de Centro de Masas, que busca minimizar el costo de distribución asumido como una función lineal de la distancia y la cantidad enviada [4].

Información Necesaria. Ambos modelos requieren de las coordenadas de ubicación de cada uno de los clientes y su importancia relativa. En cuanto a la ubicación de los clientes, se consideró 18 operadores

de alimentos y bebidas con los cuales potencialmente arrancaría el proyecto. A cada uno de ellos se le asignó coordenadas geográficas de acuerdo a su ubicación en un mapa del Distrito Metropolitano de Quito creado en Autocad/AUTOCAD.

En cuanto a la asignación de la importancia por cliente, se desarrolló una matriz de clasificación en función de los siguientes parámetros: volumen de ventas, descongestionamiento vehicular en su zona, accesibilidad vial, confiabilidad de negocio, y necesidad de reabastecimiento diario. El propósito es asignar, por cada cliente, un valor de importancia que considere, de manera ponderada, cada uno de los parámetros antes mencionados.

Resultados y Limitaciones. Por su facilidad computacional, ambos modelos fueron implementados en una hoja de cálculo de xel/EXCEL. Los resultados sugieren, en el caso del modelo Minisum, que el centro de operaciones sea ubicado en el sector La Colina. Según el modelo del Centro de Masas, el CD debería ubicarse en los alrededores del sector conocido como Guanguiltagua. Si bien los dos modelos no tuvieron resultados muy cercanos, se observa una tendencia de ambos a ubicar el punto óptimo en el lado este de la avenida Seis de Diciembre. Comparando los dos resultados, el modelo Minisum tiene un mejor desempeño dada su menor susceptibilidad a valores extremos.

Análisis de Factibilidad. Los puntos que los modelos encontraron como óptimos, minimizan el costo total de transporte; sin embargo, difícilmente se puede establecer el C.D. exactamente en dichas ubicaciones. El modelo provee una referencia geográfica a partir de la cual se puede determinar alternativas de ubicación. Luego, para cada alternativa, se debe realizar una evaluación detallada incluyendo: costos de construcción o arriendo, facilidad de acceso vial, autorizaciones municipales, entre otros.

El punto óptimo donde el modelo Minisum sugiere localizar el centro de operaciones está ubicado en el sector de La Colina, zona cuyos costos de arriendo son de los más altos de la ciudad. Además, se sugiere que sea en la avenida Seis de Diciembre; pero esto resulta poco viable dado el intenso tráfico que se genera en dicha avenida. Entre las zonas cercanas a La Colina existen algunas opciones como La Pradera, Bellavista, La Floresta, o los alrededores de la Avenida Colón. De estos sectores se eligió La Floresta como la mejor alternativa. En términos generales, se escogió a esta zona por su facilidad de acceso vial, el bajo costo comercial del suelo comparado con los demás sectores, y porque se encuentra al sur del sector La Colina, sitio donde también se concentra un importante número de negocios de alimentos y bebidas.

Diseño del Sistema de Distribución

Diseñar eficazmente un sistema de distribución implica

organizar sus elementos (manejo de inventario, manejo de productos, sistema de transporte y sistema de información) de tal manera que puedan satisfacer los requerimientos de servicio de los clientes a la vez que minimizan los costos de distribución. Es necesario que las decisiones en torno al diseño sean consistentes con la estrategia competitiva de *Food Service*, a saber: proveer a sus clientes los productos requeridos en el momento oportuno y a un precio razonable. Esto implica, en términos operativos, eficiencia, disponibilidad de productos, y capacidad de respuesta.

El diseño considera también estrategias propuestas por la Iniciativa de Respuesta de Servicios de Alimentos Eficiente (EFR). Se trata de una iniciativa desarrollada por la industria de alimentos y bebidas en los Estados Unidos para reducir costos logísticos e incrementar la efectividad global de la cadena de demanda. Propone, entre otras estrategias, la cooperación entre las partes de la cadena para intercambiar información y el uso de tecnologías de e-Business. [2]

Operación del Sistema de Reabastecimiento

Se sugiere un sistema de manejo de inventarios *justo a tiempo* caracterizado tanto por reabastecimientos frecuentes como por intercambio de información entre las partes. El uso de modelos de revisión periódica de inventario facilita realizar pedidos pequeños con frecuencia. Adicionalmente, es fundamental que clientes, proveedores, y *Food Service* intercambien información de inventario en tiempo real. Esto permitirá planificar y coordinar eficientemente los reabastecimientos. Dado que se trata de productos perecederos, es especialmente importante evitar excesiva acumulación de inventario.

Gestión del Almacenamiento y Manejo de Productos

Dos principios regirán la ubicación de cada tipo de producto en las estanterías: almacenamiento ABC y agrupación por familias. El primero sugiere que los productos de mayor rotación deberán ser los de más fácil acceso para el acopio de órdenes. El segundo principio implica dar prioridad de cercanía a aquellos ítems que generalmente suelen ser solicitados en conjunto por los clientes. [5].

Operación de la Red de Distribución

La información disponible al momento no permite realizar un diseño de rutas de distribución. Sin embargo, si se puede definir las herramientas que a futuro facilitarán y optimizarán la planeación de la distribución de los pedidos a los respectivos clientes.

Entre los modelos que pueden ser aplicados a la optimización de la red de distribución se encontró que el Problema del Agente Viajero era el más apropiado, pues permite determinar la secuencia en la que se deberá visitar a cada uno de los clientes, de tal manera que se minimice la distancia total recorrida. El modelo fue probado en

un escenario con 18 clientes utilizando el optimizador CONCORDE. Los resultados obtenidos demostraron soluciones robustas en tiempos computacionales aceptables.

Además de la aplicación del modelo del Agente Viajero, estrategias como agrupar a los clientes en zonas y/o días de abastecimiento permite minimizar tiempos de carga de camiones, tiempo de viaje entre puntos de destino, y el número de camiones necesario para el servicio. Adicionalmente, se deberá considerar aspectos como la capacidad de los vehículos, el volumen de carga por cliente y las horas permitidas de entrega a cada cliente. [6]. Nótese, sin embargo, que dichas consideraciones corresponden más a las etapas de planeación de operación antes que a la de diseño estratégico; por lo tanto, están fuera del alcance del presente estudio.

Diseño del Sistema de Información

La iniciativa EFR sugiere el aprovechamiento de las tecnologías de Internet (e-Business) para optimizar la gestión de abastecimiento. Sin embargo, el uso de dichas tecnologías, generalmente costosas, requiere de un cuidadoso diseño que asegure que su inversión y agregue valor tanto al negocio como a los clientes. Diseñar el sistema de información implica definir enfoques y procesos, y establecer las soluciones tecnológicas que permitan eficientemente automatizar dichos procesos. El objetivo es desarrollar un sistema que permita a las partes intercambiar información en tiempo real.

Enfoque

Son tres los posibles enfoques a elegir en un contexto de e-Business: excelencia en servicio, excelencia operacional y excelencia en innovación continua [7]. Debido a que el problema que se busca mitigar está vinculado con ineficiencia logística, el enfoque elegido fue el de excelencia operacional. Sin embargo, por su impacto en la satisfacción del cliente, consideraciones de innovación y servicio también son incluidas.

Procesos

Son tres los principales procesos en la cadena de demanda de *Food Service* desde el punto de vista del manejo de la información: gestión de clientes, de procesos internos y de proveedores [8]. Las soluciones tecnológicas deberán habilitar un manejo eficiente de dichos procesos.

Soluciones Tecnológicas.

En la década de los noventa, las organizaciones acostumbraron a desarrollar y usar aplicaciones para cada uno de los procesos de manejo de información. En la actualidad una misma aplicación puede cumplir todas o la gran mayoría de funciones necesarias para la gestión de dichos procesos, más aún cuando se trata de una compañía pequeña. En temas de cadena de demanda, los vendedores de sistemas de Planeación de Recursos

Empresariales (ERP) están constantemente desarrollando soluciones modulares más completas.

La base de la solución propuesta es un sistema ERP aplicado especialmente a negocios logísticos. Al módulo principal se lo conoce como Sistema Logístico de Información (SLI) y deberá estar conectado con los demás módulos ERP como, por ejemplo, el financiero o el de contabilidad. El SLI [6] está compuesto de las siguientes partes, cada una de las cuales funcionará como módulo dentro del sistema integral:

Sistema de Manejo de Pedidos.

Es la interfaz con el cliente para que éste realice su pedido. En términos generales, permite al cliente: informarse sobre la disponibilidad del producto, consultar costos, realizar un pedido y verificar el avance de la orden.

Sistema de Manejo de Bodega.

Herramienta de soporte para las siguientes funciones: ingreso de productos, manejo de inventario, manejo de pedidos, despacho de pedidos y gestión de proveedores.

Sistema de Manejo de Transporte.

Su función es la de programar rutas para la distribución de los pedidos.

El sistema ERP es el corazón de esta propuesta tecnológica. El mercado de este tipo de aplicaciones en la actualidad ofrece una gran variedad de soluciones, muchas de ellas especializadas en los negocios de alimentos y bebidas. Las opciones varían desde aplicaciones propietarias integrales hasta opciones de software libre. Será responsabilidad de la administración, en función de la disponibilidad de recursos, decidir la aplicación a instalarse. Se sugiere, por las experiencias en las diferentes industrias, optar por aplicaciones propietarias a pesar de su elevado costo.

En cuanto a la plataforma de intercambio de información, se sugiere utilizar internet por su bajo costo y fácil integración con los sistemas actuales. También, es recomendable que el sistema ERP cuente con un módulo de administración de la relación con el cliente (CRM) que permita respaldar los procesos de marketing, ventas y servicio. Finalmente, se deberá desarrollar un portal Web mediante el cual proveedores y clientes accederán al sistema informativo. Dicho portal servirá también como canal promocional de productos y servicios.

En cuanto a las limitaciones y posibles riesgos del sistema propuesto, la compatibilidad de las aplicaciones y el costo de las mismas son las de mayor consideración. Interconectar los sistemas que actualmente tienen proveedores y clientes con el sistema propuesto puede requerir ingentes inversiones. A esto se suma el hecho que, por sí, las aplicaciones empresariales y acceso a Internet de alta velocidad son costosos. Por último, implementar adecuadamente una aplicación empresarial, es decir empatar el sistema con los procesos de la empresa,

es un proceso complejo no exento de riesgos.

Conclusiones y Recomendaciones

En este artículo se propone el diseño estratégico del sistema de distribución para un proveedor de servicios logísticos en la industria de alimentos y bebidas. Los lineamientos operativos desarrollados en este estudio se basan principalmente en las estrategias de la iniciativa EFR.

En cuanto a la ubicación del centro de distribución, los resultados de los modelos analíticos sugieren dos sectores: La Colina y Guanguitagua. Sin embargo, por consideraciones de costo, facilidad de acceso vial y congestión vehicular, el sector de la Floresta resulta más apropiado.

El cuanto a cada uno de los componentes del sistema de distribución, a fin de optimizar la gestión logística, el diseño propone:

- Operar el sistema de reabastecimiento bajo los lineamientos de la filosofía *justo a tiempo*, lo que implica: coordinación, traspaso de información y reducción al mínimo de los niveles de inventario.
- Modelar la planeación de rutas usando optimizadores que implementen soluciones al Problema del Agente Viajero.
- Utilizar la política de almacenamiento de productos ABC junto con la estrategia de agrupamiento en familias para agilizar las tareas de acopio de órdenes.
- Considerar al sistema de información como el eje del diseño propuesto no sólo por las potenciales mejoras que permite alcanzar en términos de coordinación y planeación, sino también porque ser el elemento integrador entre las etapas de la cadena de demanda, es decir, proveedores, *Food Service* y sus clientes.

Se recomienda partir del diseño propuesto para las futuras decisiones concernientes a las operaciones logísticas de este negocio. Dado que el diseño brindó especial atención a la necesidad de alinear la estrategia competitiva de *Food Service* con su estructura operativa, partir de esta propuesta garantizará no sólo mejores estándares de eficiencia sino también un direccionamiento apropiado de las operaciones hacia los objetivos del negocio.

Agradecimientos

El autor agradece la dirección académica de Ximena Córdova y los aportes de José Elías Laso y Héctor Andrés Vergara.

Referencias bibliográficas

1. Laso, J. Entrevista Personal. 20 Nov. 2006.

2. Feinstein, A.; Stefanelli J. 2005. *Purchasing, Selection and Procurement for the Hospitality Industry*; Wiley: Hoboken, pp 29-49.
3. Perez, A.; Pesatty, A. 2005. "Diseño de un centro de distribución como un sistema de producción: Estudio de un caso." *Anales de la Universidad Metropolitana*, 5: 177-198.
4. Stevenson, W. 2007. *Operations Management*. McGraw-Hill: New York, pp 362-381.
5. Tompkins, J.; White, J.; Bozer, Y.; Tanchoco, J. 2004. *Facilities Planning*; Wiley: Singapore, pp 435-534.
6. Ballou, R. 2004. *Logística: administración de la cadena de suministro*; Pearson: Naucalpán de Juárez, pp 146-151, 225-236.
7. Kalatoka, R.; Robinson, M. 2001. *E-BUSINESS 2.0., Roadmap for Success*; Addison Wesley: Upper Saddle River, pp 112-115.
8. Chopra, S.; Meindl, P. 2007. *Supply Chain Management, Strategy, Planning and Operation*; Prentice Hall: Upper Saddle River: Prentice Hall, pp 485-491.

PATRONES COMPORTAMENTALES DE LA CONSTRUCCIÓN DE DOMICILIOS DE SEDA DE DOS ESPECIES DE EMBÍDIDOS TROPICALES (Insecta: Embioptera)

Sebastián Cruz

Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales, USFQ

Resumen

El orden Embioptera es uno de los órdenes de insectos menos conocidos tanto en su taxonomía, como en su filogenia e historia natural. Se sabe que producen seda con la que construyen “domicilios” que les sirven de refugio. Las diferentes especies de Embíidos varían en la calidad de su seda, las técnicas de construcción de domicilios, los sustratos para construcción y la tendencia a compartir la seda. El objetivo general de esta investigación, realizada en el Laboratorio de Ecología y Comportamiento de la USFQ, fue examinar aspectos clave del comportamiento de construcción de domicilios en dos especies de Embíidos, *Clothoda longicauda* y *Gibocercus napoe*. El análisis de los comportamientos de construcción de domicilios de seda reveló similitudes y diferencias entre las dos especies. Cada una mostró rutinas similares al tejer seda; mientras la adhieren al sustrato, mientras la tejen sobre su espalada y cuando, posteriormente, la refuerzan. En etapas posteriores, *Clothoda longicauda* cubre su seda con materiales recolectados; mientras que *Gibocercus napoe* mantiene sus domicilios únicamente de seda. Se encontraron diferencias significativas entre las dos especies en la duración de dos comportamientos: Caminar y Acicalar. Fue evidente también una gran variabilidad comportamental entre individuos de la misma especie, la cual explica la dificultad de hallar patrones comportamentales que caractericen a las dos especies de Embíidos.

Palabras Clave. Comportamiento, Embíidos, domicilios de seda.

Desarrollo

De los diversos órdenes de insectos, los Embíidos están entre los menos conocidos tanto en su taxonomía, como en su filogenia e historia natural (1). Se sabe que producen seda con la que construyen “domicilios” que les sirven de refugio (2). Las diferentes especies de Embíidos varían en la calidad de su seda, las técnicas de construcción de domicilios, los sustratos para construcción y la tendencia a compartir la seda (3). El objetivo general de esta investigación, realizada en el Laboratorio de Ecología y Comportamiento de la USFQ, fue examinar aspectos clave del comportamiento de construcción de domicilios en dos especies de Embíidos, *Clothoda longicauda* y *Gibocercus napoe*. La primera es una especie que construye domicilios de seda crípticos, que incluyen fragmentos de madera, líquenes y musgos adheridos a la seda. *Gibocercus napoe*, ocupa el mismo hábitat y es de tamaño similar a *Clothoda*, pero construye domicilios exclusivamente de seda, bastante conspicuos en los árboles de bosques tropicales. Específicamente en este estudio quise determinar las diferencias en los patrones de tejido de domicilios mediante la comparación cuantitativa de los presupuestos de tiempo de cada especie para un conjunto de comportamientos seleccionados durante un episodio de tejido.

En el año 2007, realicé filmaciones de 7 individuos de *Clothoda longicauda* y de 10 individuos de *Gibocercus napoe*, durante un episodio de tejido (duración de 1-4 horas). Consideré un episodio de tejido la elaboración

inicial de un domicilio de seda en un sustrato desnudo (sin seda). Las filmaciones fueron posteriormente analizadas para medir los tiempos de los comportamientos con el programa The Observer de Noldus versión 5.0. El software es un sistema de recolección, análisis, presentación y manejo de datos observacionales.

El análisis de los comportamientos de construcción de domicilios de seda reveló similitudes y diferencias entre las dos especies. Cada una mostró rutinas similares al tejer seda; mientras la adhieren al sustrato, mientras la tejen sobre su espalada y cuando, posteriormente, la refuerzan. En etapas posteriores, *Clothoda longicauda* cubre su seda con materiales recolectados; mientras que *Gibocercus napoe* mantiene sus domicilios únicamente de seda. Se encontraron diferencias significativas entre las dos especies en la duración de dos comportamientos: Caminar y Acicalar. Fue evidente también una gran variabilidad comportamental entre individuos de la misma especie, la cual explica la dificultad de hallar patrones comportamentales que caractericen a las dos especies de Embíidos.

Este estudio es una contribución al conocimiento sobre el comportamiento y la ecología del Orden Embioptera y evidencia la necesidad de estudiar más a fondo a estos insectos que exhiben una amplia gama de comportamientos biológicamente importantes. Los Embíidos tienen comportamientos de cuidado maternal complejos y son a menudo coloniales. Emplean la seda para construir galerías grandes y complicadas donde residen.

Se conoce también muy poco sobre la composición de proteínas de la seda y la base genética para la producción de este material. [1, 3].

Referencias bibliográficas.

1. Edgerly, J.S. 1997. Life Beneath Silk Walls: A Review of the Primitively Social Embiidina. En: *The Evolution of Social Behavior in Insects and Archnids*. J. Choe y B. Crespi (eds), Cambridge University Press. pp. 14-25.
2. Ross, E. S. 1987. Studies in the insect order Embiidina: A revision of the family Clothodidae. *Proceedings of the Californian Academy of Science* 41: 9-34.
3. Edgerly, J.S.; Davilla, J.A.; Shoenfeld, N. 2002 Silk spinning behaviour and domicile construction in webspinners. *Insect Behaviour* 15: 219-242.

OTRAS PUBLICACIONES DE LA USFQ, 2007-2008.

ARTÍCULOS CIENTÍFICOS (en orden alfabético)

Bonifaz, E.A. 2007. Thermo-Mechanical Modeling of Single Fusion Welds. *Canadian Welding Association Journal* . Summer, pp. 13-20.

Bonifaz, E.A. and Richards, N.L. 2008. The Plastic Deformation of Non-Homogeneous Polycrystals. *International Journal of Plasticity*. 24, 2, pp. 289–301.

Bonifaz, E.A. and Richards, N.L. 2008. Modeling Cast IN-738 Superalloy Gas Tungsten-Arc-Welds (PART I). *Acta Materialia*, under Review (Ref. Ms. No. A-08-1165R1)

Bonifaz, E.A. and Richards, N.L. 2008. Modeling Cast IN-738 Superalloy Gas Tungsten-Arc-Welds (PART II). Submitted to *Acta Materialia* (Ref. Ms. No. A-08-1166)

Buchwaldt, R., **Toulkeridis, T.**, Ucauwun, K. E. and Todt, W., 2008. Geochronologic evolution of middle-Proterozoic granites from SW Uganda and associated mineralization (Be, Sn, Au). *J. of African Earth Sciences*, 51, 4-20.

Bustamante, J.C. 2008. Tres problemas básicos de álgebra lineal: una invitación a la Teoría de Representaciones. *Actas del XII Encuentro Nacional de Matemáticas*. Quito, Ecuador.

Carrera, V. 2007. A Generic Infrastructure for Web Computing. In *Proceedings of the Latin-American Conference on High Performance Computing*. Santa Marta, Colombia.

Carrera, V. 2008. A Simple and Efficient Algorithm for Automatic Web Page Classification. In *Proceedings of the IV International Conference of the IEEE Andean Region*. Cusco, Peru.

de la Torre, S.; Yépez, P. 2007. Una sola familia, en: Caminando en el sendero; hacia la conservación del ambiente y la cultura Secoya. S. de la Torre y P. Yépez (Eds). Fundación VIHOMA. Noción; Quito. pp. 1-4.

de la Torre, S.; Payaguaje, H.; Payaguaje, P.; Payaguaje, A. 2007. Investigación participativa y conservación de la fauna en tierras Secoya, en: Caminando en el sendero; hacia la conservación del ambiente y la cultura Secoya. S. de la Torre y P. Yépez (Eds). Fundación VIHOMA. Noción; Quito. pp. 77-90.

de la Torre, S.; Yépez, P.; Snowdon, C.T. 2007. Ecología y conservación del leoncillo *Callithrix (Cebuella) pygmaea* en tierras Secoya, en: Caminando en el sendero; hacia la conservación del ambiente y la cultura Secoya. S. de la Torre y P. Yépez (Eds). Fundación VIHOMA. Quito. pp. 91-98.

de la Torre, S.; Snowdon, C.T.; Yépez, P. 2007. Precious variability: behavior; ecology and conservation of pygmy marmosets in Ecuador. Memories of the 30th Meeting of the American Society of Primatologists. Salem. USA.

de la Torre, S. 2008. Las plantas y los animales: alimento de vertebrados, en: Enciclopedia de las plantas útiles del Ecuador. L. de la Torre; H. Navarrete; P. Muriel M.; M. J. Macía & H. Balslev (Eds.). Herbario QCA & Herbario AAU. Quito y Aarhus. pp. 71-75.

de la Torre, S. 2008. Amazonía del Ecuador; cultura; ambiente y conservación. Mecanismos de participación ciudadana en salud y ambiente. Foro Latinoamericano sobre la Gobernanza. IRG.

de la Torre, S.; Yépez, P.; Snowdon, C.T. en prensa. Ecology and conservation of pygmy marmosets in Amazonian Ecuador. En: The Smallest Anthropoids: The Marmoset/Callimico Radiation. L.C. Davis ; S.M. Ford; L. Porter (Eds.). Springer Verlag.

de la Torre, S. en prensa. Ecuadorian Pitheciines. En: Evolutionary Biology and Conservation of Titis, Sakis and Uacaris, A.A. Barnett, L.M. Veiga, S.F. Ferrari, M.A. Norconk (eds) Cambridge University Press, Cambridge

de la Torre, S. and Snowdon, C.T. en prensa. Dialects in pygmy marmosets? Inter-population variation in call structure. American Journal of Primatology

Dueno, E.E.; Hunter, A.D.; Zeller, M.; Ray, T.A.; Salvatore, R.N. and **Zambrano, C.H.** 2008. Crystal Structure of 2, 8, 14, 20- tert -Butylpyrogallol[4]arene. *Journal of Chemical Crystallography*, 38, 3.

Dueno, E.E.; Gibson, R.J.P.; Salvatore, R.N.; Pike, R.D. and **Zambrano, C.H.** 2008. 2,2,3,3'-Tetraphenyl-7,7'-biquinoline. *Acta Cryst.* E64, o110-o111

Dueno, E.E.; Ray, T.; Salvatore, R.N.; **Zambrano, C.;** Zeller, M. and Hunter, A.D. 2007. 2,8,14,20-Tetrakis(4-hydroxyphenyl)pyrogallol[4]arene dimethylformamide hexasolvate *Acta Cryst.* E63, o3533-o3534

Encalada, A.C. and Peckarsky, B.L. 2007. A comparative study of the costs of alternative mayfly oviposition behaviors. *Behav Ecol Sociobiol* 61, 1437-1448.

Endara, P.; **Trueba, G.;** Solberg, O.; Bates, S.; Ponce, K.; Cevallos, W.; Matthijssens, J. and Eisenberg, J. 2007. Emerging rotavirus genotype causing symptomatic and asymptomatic infection in rural Ecuador. *Emerging Infectious Diseases* 13:574-580.

Marín, C. 2008. Del Big Bang a Dolly (Capítulo 9: Teoría Especial de la Relatividad y Capítulo 9: Teoría General de la Relatividad). Montúfar, C.; Trueba G. (Eds.) Tercera edición. Centro de Desarrollo de la Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador. ISBN 9978-68-018-7.

de la Torre, R. 2008. Del Big Bang a Dolly (Capítulo X: Los microbios y la digestión de la celulosa). Montúfar, C.; Trueba G. (Eds.) Tercera edición. Centro de Desarrollo de la Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador. ISBN 9978-68-018-7.

Mejía, M.E.; **Barragán, V.;** Zapata, S.; **Trueba, G.** 2007. Interactions of Pathogenic Leptospira with Environmental Bacteria. Proceedings 5th Meeting of the International Leptospirosis Society. ISBN 978-9978-68-026-1.

Mena, C.F. 2008. Trajectories of Land Use and Land Cover in the Northern Ecuadorian Amazon: Temporal Composition, Spatial Configuration, and Probability of Change. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 74(6): 737-752.

Niebieskikwiat, D.; Hueso, L.E.; Borchers, J.A.; Mathur, N.D. and Salamon, M.B. 2007. Nanoscale magnetic structure of ferromagnet/antiferromagnet manganite multilayers. *Physical Review Letters* 99, 247207

Niebieskikwiat, D.; Tao, J.; Zuo, J.M. and Salamon, M.B. 2008. Time-dependent phenomena in phase-separated electron-doped manganites. *Physical Review B.* 78, 014434

- Niebieskikwiat, D.**; Hueso, L.E.; Mathur, N.D. and Salamon, M.B. 2008. Magnetotransport of manganite superlattices: Investigating the role of a magnetic insulating spacer. *Applied Physics Letters*. 93, 123120.
- Padrón, E.; Hernández, P.A.; Marrero, R.; Melián, G.; **Toulkeridis, T.**; Pérez, N.M.; Virgili, G. and Notsu, K. 2008. Diffuse CO₂ emission rate from the lake-filled Cuicocha and Pululagua calderas, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research (Special Volume on Continental Ecuador volcanoes)*. 176, 163-169.
- Porter, J.D.; Kim, D.S.; **Vergara, H.A.**; Long, M.D. and Staley, D.R. 2007. Performance evaluation of an RFID-based vehicle-miles-travelled revenue collection system. *Int. J. Radio Frequency Identification Technology and Applications*. 1, 2, pp.164–186.
- Ramírez-Cárdenas, L.**; Leonel, A.J. & Costa, N.M.B. 2008. Efeito do processamento doméstico sobre o teor de nutrientes e de fatores antinutricionais de diferentes cultivares de feijão comum. *Revista da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos*. SBCTA. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, 28 (1): 200-213.
- Ramírez-Cárdenas, L.**, Rosa, C.O.B. & Costa, N.M.B. 2008. Propriedades funcionais do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). En: Costa, N.M.B., Rosa, C.O.B., (Eds). **Alimentos funcionais. Benefícios para a saúde**. Viosa-MG, Brasil. pp. 1-32.
- Rindfuss, R.R.; Entwisle, B.; Walsh, S.J.; An, L.; Badenoch, N.; Brown, D.G.; Deadman, P.; Evans, T.P.; Fox, J.; Geoghegan, J.; Gutmann, M.; Kelly, M.; Linderman, M.; Liu, J.; Malanson, G.P.; **Mena, C.F.**; *et al.* 2008 Land use change: complexity and comparisons *Journal of Land Use Science* 3(1): 1 – 10.
- Rindfuss, R.R.; Entwisle, B.; Walsh, S.J.; **Mena, C.F.**; Erlien, C.M.; Gray, C.L. 2007. Frontier Land Use Change: Synthesis and Next Steps, *Annals of the Association of American Geographers* 97(4): 739-754.
- Ridolfi, F.; Puerini, M.; Renzulli, A.; Menna, M. and **Toulkeridis, T.** 2008. The magmatic feeding system of El Reventador volcano (Sub-Andean zone, Ecuador) constrained by mineralogy, textures and geothermobarometry of the 2002 erupted products. *Journal of Volcanology and Geothermal Research (Special Volume on Continental Ecuador volcanoes)*. 176, 94-106.
- Rios, M.; Borgtoft Pedersen, H.; **Kozioł, M.J.** & Granda, G. 2007. La colección etnobotánica del Herbario QCA (Ethnobotanical collection of the Herbarium QCA). En *Plantas Útiles del Ecuador: Aplicaciones, Retos y Perspectivas (Useful Plants of Ecuador: Applications, Challenges, and Perspectives)*. M. Rios, M.J. Kozioł, H. Borgtoft Pedersen & G Granda (eds). Abya-Yala, Quito, Ecuador. pp. 111-544.
- Rios, M.; **Kozioł, M.J.**; Borgtoft Pedersen, H. & Granda, G. 2007. *Plantas Útiles del Ecuador: Aplicaciones, Retos y Perspectivas (Useful Plants of Ecuador: Applications, Challenges, and Perspectives)*. Abya-Yala, Quito, Ecuador. 652 pp .
- Rios, M.; **Kozioł, M.J.**; Haro-Carrión, X. & Borgtoft Pedersen, H. 2007. Los estudios etnobotánicos en el Ecuador: escenario actual y desafíos (Ethnobotanical investigations in Ecuador: current situation and challenges). En *Plantas Útiles del Ecuador: Aplicaciones, Retos y Perspectivas (Useful Plants of Ecuador: Applications, Challenges, and Perspectives)*. M. Rios, M.J. Kozioł, H. Borgtoft Pedersen & G Granda (eds). Abya-Yala, Quito, Ecuador. pp. 51-107.
- Rylands, A.B.; Mittermeier, R.A.; Coimbra-Filho, A.F.; Heymann, E.W.; **de la Torre, S.**; de Sousa e Silva, J.; Kierulff, C.M.; Noroña, M.; Rohe, F. 2008. Marmosets and Tamarins; pocket identification guide. Conservation International. Tropical Pocket Guide Series.
- Terán, M.C.; Clark, K.; Suárez, C.; Ruiz, D.; Luna, S.; Ortiz, E.; **Denkinger, J.**; Jiménez, P.; Guarderas, P. y Campos, F. 2007. Identificación de vacíos y prioridades para la conservación de la plataforma marina del Ecuador continental. En: Campos, F.; Peralvo, M.; Cuesta-Camacho, F. y Luna, S. (Eds.). 2007. Análisis de vacíos y áreas prioritarias para la conservación para la biodiversidad en el Ecuador continental. Instituto Nazca de Investigaciones Marinas; EcoCiencia; Ministerio de Ambiente; The Nature Conservancy; Conservación Internacional; Proyecto GEF: Ecuador Sistema Nacional de Áreas Protegidas; BirdLife Internacional y Aves & Conservación. Quito.

Torres, A.F.; Arias, A.S.; **Arahana, V. & Torres, M.L.** En prensa. Preliminary assessment of genetic diversity and phenetic relations for section *Lasiocarpa* by means of heterologous SSR markers. *Crop Science*.

Torres, M.L. 2007. Editora Técnica. Material de Consulta. Desenredando las complejidades. Organismos Genéticamente Modificados y Bioseguridad. Ecociencia y Ministerio de Ambiente. Programa de Conservación de la Biodiversidad, el Páramo y otros ecosistemas frágiles del Ecuador, Ecociencia - Embajada de Holanda y Proyecto Implementación del Marco Nacional de Bioseguridad PUNMA-GEF-MAE. Quito.

Toulkeridis, T., Buchwaldt, R. and Addison, A. 2007. When Volcanoes Threaten, Scientists Warn. *Geotimes*, 52, 36-39.

Valle, C. A.; De Vries, T.J. and Hernandez, C. 2008. Kleptoparasitism in Great Frigatebirds: social dominance; sexual size dimorphism and aerodynamic constraints. Pages 17-37 in L. Hacquebord and N. Boschman (Eds.). A Passion for the Pole: Ethological Research in Polar Regions. Circumpolar Studies; Vol. 4. Arctisch Centrum; Groeningen.

Vergara, H.A. and Kim, D.S. 2008. A new method for the placement of buffers in serial production lines. *International Journal of Production Research*. First Published Online on: April 23rd

Vieira, N.; Bates, S.J.; Solberg, O.D.; Ponce, K.; Howsmon, R.; Cevallos, W.; **Trueba, G.**; Riley, L.; Eisenberg, J.N. 2007. High prevalence of enteroinvasive *Escherichia coli* isolated in a remote region of northern coastal Ecuador. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 76:528-533.

Walsh, S.J.; McCleary, A.; **Mena, C.F.**; Tuttle, J.; Shao, Y.; Atkinson, R.; Gonzales, A. 2008. Hyper-Spatial and Hyper-Spectral Remote Sensing of an Invasive Plant in the Galapagos National Park and Archipelago: Spatial Structure and Implications for Control. *Remote Sensing of the Environment* 112(5):1927-1941.

Walsh, S.J.; Messina, J.P.; **Mena, C.F.**; Malanson, G.P.; Page, P.H. 2008. Complexity and Land Use Dynamics in the Northern Ecuadorian Amazon, *GeoForum* 39:867-878.

Walsh, S.J.; Shao, Y.; **Mena, C.F.**; McCleary, A. 2008. Integration of Hyperion Satellite Data and a Household Social Survey to Characterize the Causes and Consequences of Reforestation Patterns in the Northern Ecuadorian Amazon. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 74(6): 725-736.

Wang, W.; Dia, V.P.; **Vásconez, M.** & González de Mejía, E. In Press. Analysis of soy peptides and the effect of cultivar, environmental conditions, and processing on lunasin concentration in soybean and soy products. En: Special edition of Journal of the Association of Official Analytical Chemists International on Accurate methodology for amino acids and bioactive peptides in functional foods and dietary supplements for assessing protein adequacy and health effects.

Weiss-Schneeweiss, H.; Stuessy, T.F.; Tremetsberger, K.; Urtubey, E.; **Valdebenito, H.**; Beck, S.G. and Baeza, C.M. 2007. Chromosome numbers and karyotypes of South American species and populations of *Hypochoeris* (Asteraceae). *Bot. J. Linnean Society* 153: 49 – 60.

Wilcox, A.C.; Peckarsky, B.L.; Taylor, B.W. and **Encalada, A.C.** 2008. Hydraulic and geomorphic effects on mayfly drift in high-gradient streams at moderate discharges. *Ecohydrology* 1; 176–186.

Woodward, C.L.; Berry, P.E.; Maas-van de Kamer, H. y **Swing, C.K.** 2007. *Tiputinia foetida*; a new mycoheterotrophic genus from Amazonian Ecuador; and a likely case of deceit pollination. *Taxon* 56(1):157-162.

Zambrano, C.H.; Pike, R.D.; Gibson, R.J.P.; Barger, B.D. and Dueno, E.E. 2007. 7,8-Dichloro-1,2,3,4-tetrahydrophenazine. *Acta Cryst.* E63, o3841.

Zambrano, C.H.; Thomas, R.E.; Zeller, M.; Salvatore, R.N. and Dueno, E.E. 2007. 2,8,14,20-paramethoxytetraphenylpyrogallol[4]arene dimethylformamide hexasolvate. *Acta Cryst.* E63, o3452-o3453

Zapata, S.; **Trueba, G.** Bulach, D.; Boucher, D.; Cox, A.; Adler, B. and Hartskeerl, R. 2007. Structural Features of Leptospiral O-antigen Revealed by a LPS Mutant; Universidad San Francisco de Quito; Ecuador. Royal Tropical Institute; Ámsterdam; The Netherlands. Monash University; Melbourne; Australia. Institute

for Biological Sciences; National Research Council; Ottawa; ON; Canada. Poster Proceedings 5th Meeting of the International Leptospirosis Society. ISBN 978-9978-68-026-1.

LIBROS

de la Torre, S.; Yépez, P. (Eds). 2007. Caminando en el sendero; hacia la conservación del ambiente y la cultura Secoya. Fundación VIHOMA. Noción; Quito. pp. 185. ISBN 978-9978-45-754-2.

ECOLAP, MAE. 2007. Guía del Patrimonio de Áreas Naturales Protegidas del Ecuador. ECOFUND, FAN, DarwinNet, IGM. Ministerio de Ambiente. Quito; Ecuador. Coloma, A.; Gallardo, G.; Rivera J. (Eds.). ISBN 978-99-78-45-945-4

Eran, A.; Toral-Granda, M.V.; Martínez, C.E.; **Reck, G.K.** 2007. Biology and Fishery of the Galapagos Slipper Lobster. Chapter 18. in Slipper Lobsters of the World. Taylor & Francis Group (Eds.)

Gallardo, G. and **Toulkeridis, T.** 2008. Volcanic Caves in Galapagos and other speleological attractions (bilingual Spanish-English). Editorial CGVG-IGM, Quito, Ecuador. Geo-series #2: 56 pp. ISBN 978-942-01-675-1.

Marín; C. 2007. La expansión del Universo. Una introducción a Relatividad General, Física de Partículas y Cosmología. Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador.

Toulkeridis, T. and Zak, V. 2008. Cuicocha - Lake of the Gods (bilingual Spanish-English). Editorial CGVG-IGM, Quito, Ecuador. Geo-series #1: 80 pp. ISBN 978-9942-01-676-8.

Walsh, S.J.; Malanson, G.P.; Brown, D.G.; Messina, J.P.; **Mena, C.F.** In Press. Biocomplexity. In: *Handbook of Biogeography*; Blumler M., M.; MacDonald, G.; Millington, A.; Schickhoff, U. (Eds.), Sage Publications. London.