

VOL. 31, Nº 1

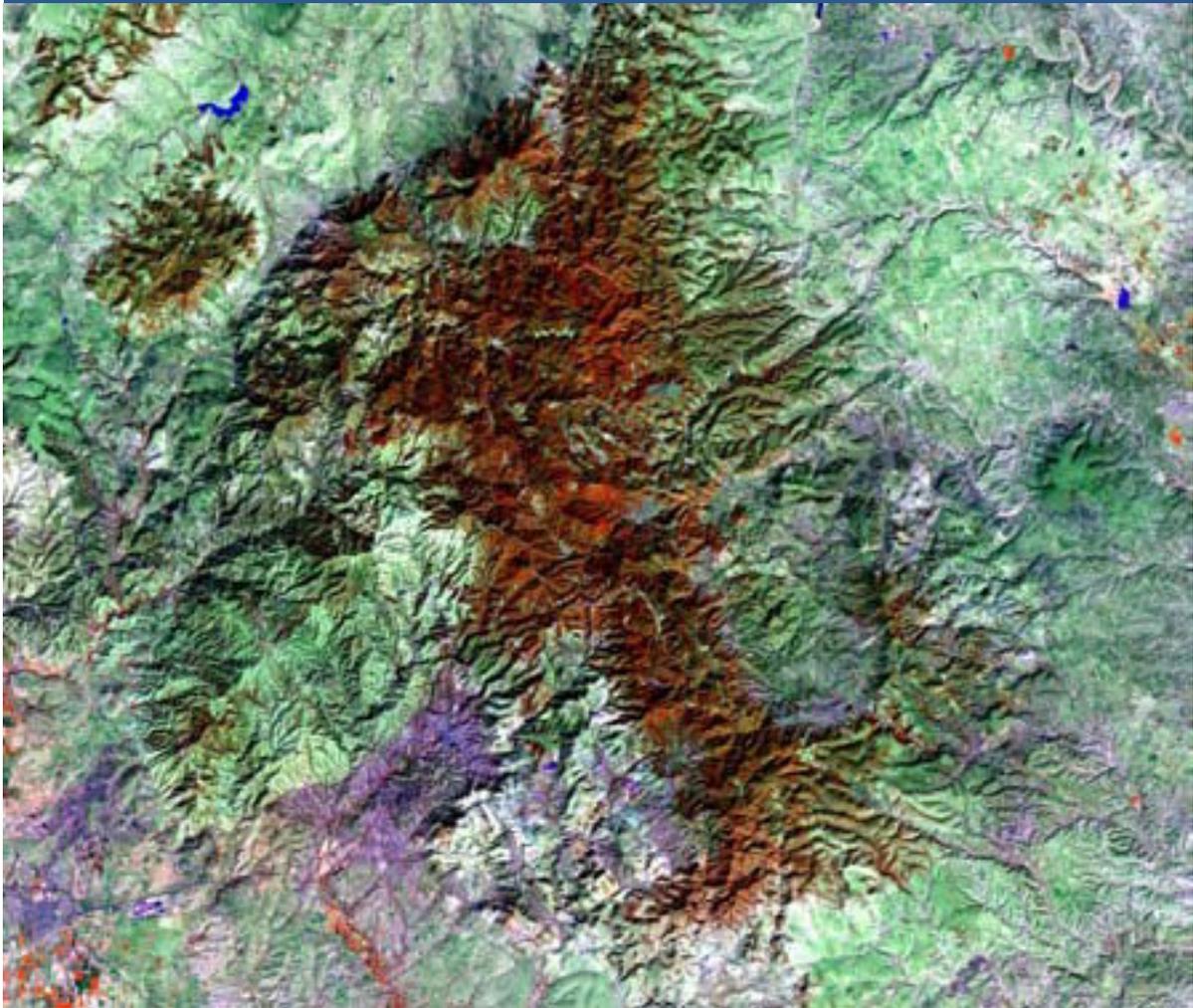
JUNIO 2011

ISSN 0717-2915



Revista
Journal

SELPER



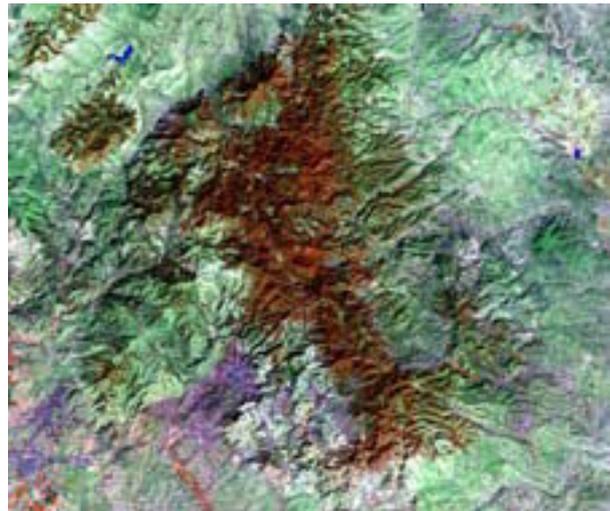
Guanajuato - México
Imagen de satélite Landsat 7 ETM



FOTO PORTADA

Guanajuato - México

Imagen de satélite Landsat ETM+, resolución espacial 30 metros, en composición Falso Color (4,5,3 / RGB), correspondiente a Guanajuato, México, y alrededores. Guanajuato se encuentra dentro de tres grandes provincias fisiográficas; la Mesa del Centro (norte); la Sierra Madre Oriental (noreste) y el Eje Neovolcánico (centro-sur). La palabra Guanajuato viene de los vocablos Kuanasí y Uato del idioma purépecha, que significa "Lugar montuoso de ranas" o "cerro de ranas". Obtenida de Global Land Cover Facility, Maryland.



DIRECTORIO SELPER, SEDE MEXICO 2010 - 2012

Universidad Autónoma de Tamaulipas
Cd. Victoria, Tam. México
Tel. (834)3181721 - (834) 3189361
Selper.internacional@gmail.com

PRESIDENTE

Silvia Casas Gonzalez
Mexico

VICE-PRESIDENTE

Eloy Perez
Cuba

VICE-PRESIDENTE

Aurelie Sand
Francia

VICE-PRESIDENTE

Isabel Cruz
Mexico

SECRETARIO GENERAL

Fabián Lozano
Mexico

RESPONSABLE DE DIVULGACIÓN ELECTRÓNICA

Victor Flores
Mexico

TESORERO

Brenda Portes
Mexico

COMITÉ DE RELACIONES
INTERNACIONALES

Myriam Ardila Torres (Colombia)
Presidente
Laurent Durieux – Francia
Pedro Luis García Pérez - Cuba
Pedro Martínez Fernández - Cuba
Olga Piedad Rudas - Colombia
Anyul del Pilar Mora - Colombia
Luis Geraldo Ferreira - Brasil
Washintong Franca Rocha - Brasil
Victor Barrena - Perú
Ramiro Salcedo - Venezuela

COMITÉ EDITORIAL

María Cristina Serafini (Argentina)
Presidente
Miriam Esther Antes – Argentina
Fabián Lozano – México
Leila María Fonseca – Brasil
Jorge Martín Chiroles - Cuba
Francisca Celia González - Argentina
Freddy Flores – Venezuela

COMITÉ DE EDUCACIÓN

María Antonia García Cisnero (Cuba)
Presidente
Luz Angela Rocha Salamanca- Colombia
Laura Delgado - Venezuela
Ethel Rubin de Celis Llanos - Perú
Josselisa Ma. Chávez - Brasil

COMITÉ DE PROYECTOS
INTERNACIONALES

Paulo Roberto Martini (Brasil)
Presidente
Christopher Charron – Francia
Alfredo Cuello – Argentina

CAPÍTULOS CONSTITUIDOS

ARGENTINA
Francisca Celia González
Universidad Nacional del Sur
Departamento de Geología
San Juan 670 (8000)
Bahía Blanca, Argentina
Tel: 54 - 291 - 459 5102 - int. 4360
Fax: 54 - 291 - 459 5127
E-mail: ghgonzal@criba.edu.ar

BOLIVIA
José Luis Liseca
Carrera de Topografía y Geodesia
Facultad Técnica
Universidad Mayor de San Andrés
Av. Arce 2299 1º Piso
La Paz, Bolivia
Tel.: 591-2-2441401
E-mail: jliseca@hotmail.com

BRASIL
Leila María García Fonseca
INPE
Av. Dos Astronautas 1758, Sao José dos Campos
San Pablo, Brasil
Tel: 55 - 12-39456000
E-mail: leila@dpi.inpe.br

CHILE
Gina Ghio
Data Research servicios de Ingeniería
Manuel Antonio Prieto 0152
Santiago, Chile.
Tel: 562 - 6651730
Fax: 562 - 6659201
E-mail: ginaghio@datasearch.cl

COLOMBIA
Olga Piedad Rudas
Carrera 30 No. 48-51 Edificio IGAC-CIAF Of. 212
Bogotá D.C., Colombia
Tel: 57-1-369-4096
Fax: 57-1-369-4096
E-mail: orudas@prosis.com

CUBA
Pedro Luis García Pérez
Sede UNAICC, Humboldt No. 104,
Esquina a Infanta, Vedado, La Habana, Cuba
Telf.: (5 37) 8363447
E-mail: lgarcia@ch.unaicc.cu

ECUADOR
Cor. Ricardo Urbina
CLIRSEN
Edif. Instituto Geográfico Militar, Piso 4
Seniergues s/n y Paz y Mifio
Apartado Postal 17-08-8216
Quito, Ecuador
Tel.: 593- 2- 254-3193
Fax: 593- 2- 255-5454
E-mail: ricardo.urbina@clirsen.com

GUATEMALA
Carlos Alberto Duarte
Ingeniería Virtual
Ruta 4, 6-49 Zona 4, Oficina 14
Ciudad de Guatemala (01004), Guatemala
Tel: 502 - 334-1039/4038
Fax: 502 - 331-9390
E-mail: chduarte@hotmail.com

GUYANA FRANCESA
Laurent Polidori
Directeur de Recherche IRD / US ESPACE 140
Institut de Recherche pour le Développement
(ex-ORSTOM)
Route de Montabo - BP 165 - 97323 Cayenne
cedex
Tel. (+594) 594 29 92 81
Fax (+594) 594 31 98 55
E-mail: polidori@cayenne.ird.fr

MÉXICO
Jean Francois Mas
UNAM Campus Morelia
Morelia, Michoacan, México
E-mail: jfmas@ciga.unam.mx

FRANCIA
Aurélien SAND
CNES
18 avenue Edouard Belin, 31401 Toulouse
Cedex 9
tél : 05 61 27 43 89
sec : 05 61 28 14 54, Christine Faure
E-mail: aurelie.sand@cnes.fr

URUGUAY
Antonio Alarcón
Servicio de Sensores Remotos Aeroespaciales
Fuerza Aérea Uruguaya
Ruta 101 s/n Km. 19500
Carrasco, Canelones, Uruguay
Tel.: 598 -2 601 4083
Fax: 598 -2 601 4090
E-mail: aalarconv@hiotmail.com

VENEZUELA
Ramiro Salcedo
Centro de Procesamiento Digital del Instituto de
Ingeniería en Caracas
Apdo. Postal 40200 / Caracas, Venezuela
Tel/fax: 58 - 212 - 903 -4682
E-mail: ramiros@fii.org

PERÚ
Victor Barrena Arroyo
Universidad Nacional Agraria La Molina
Av. La Universidad s/n
La Molina, Lima, Perú
Tel / Fax: 51-1-349-5647 anexo 232/349-2041
E-mail: sbarrena@lnmolina.edu.pe

CAPÍTULOS EN FORMACIÓN

PARAGUAY
Sergio M. Burgos Sosa
IPPA
Dr. César Sánchez 431
San Lorenzo, Paraguay
Tel/Fax: 595- 21-574909
Email: smburgos@highway.com.py

CAPÍTULOS ESPECIALES

ALEMANIA
Klaus Reimiger
DLR
D-8031 Oberpfaffenhofen
Alemania
Tel: 49- 8153- 281.189
Fax: 49- 8153- 281.443

CANADÁ
Fritz P. Dubois
25 Nidland
Crs Nepean Ontario Kh2-8n2
Ontario, Canadá
Tel: 613- 596-4164
Fax: 613- 723-9626

ESPAÑA
José L. Labrandero
Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)
Pinar 25- Madrid 28006, España
Tel: 34- 411.10.98
Fax: 34- 562.55.67

HOLANDA
Carlos Valenzuela
ITC
350 Boulevard 1945, P.O.X. 6. 7500 AA
Enschede, Holanda
Tel.: 31 53 874-444
Fax: 31 53 874-400

ITALIA
Francesco Sarti
ESA/ESRIN
Via Galileo Galilei, s/n
I-00044 Frascati, Italia
Tel: 39 - 694180409
Fax: 39 - 694180602
E-mail: Francesco.Sarti@esa.int

Maurizio Fca
via Alessandro Poerio, 49
00152 Roma
tel/fax: +39065880581
móvil: +393281771383
E-mail: maufca@gmail.com

USA
Patricia M. Ravelo
SPOT
Estados Unidos
Tel: 1-800-ask-spot ext. 137
Fax: 703-648.1813
E-mail: ravelo@spot.com



ÍNDICE TEMÁTICO

COMITÉ EDITORIAL

María Cristina Serafini (Argentina)
PRODITEL
Universidad Nacional de Luján
Cruce rutas 5 y ex 7
(6700) Luján, Buenos Aires, Argentina
Tel: 54-2323-423171 int 248
Fax: 54-2323-425795
E-mail: proditel@mail.unlu.edu.ar

Miriam Esther Antes (Argentina)
PRODITEL
Universidad Nacional de Luján
Cruce rutas 5 y ex 7
Luján, Buenos Aires, Argentina
Tel: 54-2323-423171 int 248
Fax: 54-2323-425795
E-mail: proditel@mail.unlu.edu.ar

Leila María Fonseca (Brasil)
INPE
Av. Dos Astronautas 1758, Sao José dos
Campos, Sao Paulo, Brasil
Tel: 55 - 12-39456000
E-mail: leila@dpi.inpe.br

Fabián Lozano (Mexico)
Instituto Tecnológico y de Estudios
Superiores de Monterrey
Av. Eugenio Garza Sada # 2501 sur,
Col. Tecnológico, Monterrey, Nuevo
León, México
Tel: 52 - 81 - 8358 - 1400 ext 5275
Fax: 52 - 81 - 8358 - 6280
E-mail: dflozano@itesm.mx

Jorge Martín Chiroles (Cuba)
E-mail: ciencia@geocuba.com.cu

Francisca Celia González (Argentina)
Universidad Nacional del Sur
Departamento de Geología
San Juan 670 (8000)
Bahía Blanca, Argentina
Tel: 54 - 291 - 459 5102 - int. 4360
Fax: 54 - 291 - 459 5127
E-mail: ghgonzal@criba.edu.ar

Freddy Flores (Venezuela)
Fundación Instituto de Ingeniería
Carretera Vieja de Baruta, Sector
Sartenejas, Urb. Monte Elena II
Caracas, Venezuela
Tel: 58 2-903 4661-4610
Fax: 58 2- 903 4780
E-mail: freddyf@fii.org

COMITÉ DE EVALUADORES

Fabián Lozano
(Tecnológico de Monterrey - México)
Silvia Casas González
(Universidad Nacional Autónoma de
Tamaulipas - México)
Fabiola Yepez Rincón
(Universidad Nacional Autónoma de
Tamaulipas - México)

● **Una comparación de diferentes enfoques de modelación de cambios de cobertura / uso del suelo**

Jean-François Mas

Melanie Kolb

Thomas Houet

Martin Paegelow

María Teresa Camacho Olmedo5

● **Evolución espacio-temporal del glaciario cuaternario: Caso Parque Nacional Sierra Nevada, Venezuela**

Santiago Yépez

Eduardo Carrillo 14

● **Mapping brazilian geoglyphs through HRC-CBERS-2B images**

Paulo Roberto Martini 23

● **Evaluación de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM y su relación con los errores planimétricos de datos pancromáticos Quickbird ortorrectificados**

Gastón M. Díaz

Mariano Gomez

Florencia Deccechis

José D. Lencinas

Héctor Francisco del Valle 29



PLAN EDITORIAL SELPER 2010 - 2012



PLAN EDITORIAL SELPER

A partir de las decisiones adoptadas en el marco del XIII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial, llevado a cabo en La Habana, Cuba, en setiembre de 2008, la edición de la Revista SELPER está disponible en la página de nuestra Sociedad: <http://www.selper.org>.

En esta oportunidad hacemos llegar la publicación del volumen 31 Número 1, donde se incluyen trabajos que han sido presentados en el XIV Simposio Latinoamericano en Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial, desarrollado en Guanajuato, México, entre los días 8 y 12 de noviembre de 2010.

La revisión de estos trabajos ha sido realizada por los miembros del Comité Organizador del mencionado Simposio bajo la coordinación del Dr. Fabián Lozano, a quién agradecemos su aporte.

NORMAS PARA LOS AUTORES

Los artículos recibidos serán enviados a tres (3) expertos en la temática para su revisión. Los trabajos aprobados serán publicados en estricto orden, de acuerdo a las fechas de llegada de las contribuciones.

Los idiomas oficiales SELPER son: Español, Portugués e Inglés.

Los trabajos deberán estructurarse contemplando las siguientes secciones:

- a) Título del trabajo. Nombre de los autores y direcciones completas
- b) Resumen (no más de 150 palabras) indicando al final las palabras claves. Deberá incluirse en Español o Portugués, además de Inglés
- c) Introducción
- d) Objetivos
- e) Metodología empleada y materiales

f) Resultados obtenidos

g) Conclusiones

h) Bibliografía: sólo se incluirá la citada en el texto. Se indicarán los autores, por orden alfabético, año, título, revista o medio donde fue publicado, incluyendo volumen y páginas, cuando corresponda.

Los títulos y subtítulos de cada sección deberán estar claramente indicados (ya sea con numeración o tamaño de letras). Las tablas, fotos y figuras deberán ser suficientemente nítidas, llevar un título y estar numeradas en forma consecutiva.

Se deberá enviar una copia del trabajo en formato Word y una copia papel. La extensión total del trabajo no deberá superar las 12 páginas, (DIN-A4).

Los trabajos se enviarán a: editorial@selper.org

Una comparación de diferentes enfoques de modelación de cambios de cobertura / uso del suelo

Jean-François Mas 1, Melanie Kolb 2, Thomas Houet 3, Martin Paegelow 3, María Teresa Camacho Olmedo 4

1 Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701 Col. Ex-Hacienda de San José de La Huerta C.P. 58190 Morelia Michoacán MÉXICO

2 Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad Liga Periférico - Insurgentes Sur, Núm. 4903, Col. Parques del Pedregal Delegación Tlalpan, 14010 México, D.F. Posgrado en Geografía – UNAM MÉXICO

3 Laboratoire GEODE Maison de la Recherche de l'Université du Mirail 5, Allées A. Machado - 31058 TOULOUSE Cedex 1 FRANCIA

4 Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física Facultad de Filosofía y Letras Universidad de Granada Campus de Cartuja s/n. 18071 Granada ESPAÑA

RESUMEN

Durante las últimas décadas, una gran variedad de modelos fueron desarrollados para modelar los cambios de uso/cobertura del suelo (CUCS). En este estudio, se comparan cuatro programas de modelación: CLUE, DINAMICA EGO, CA_Markov and Land Change Modeler (ambos disponible en IDRISI). En un primer paso, se revisaron los diferentes métodos y herramientas disponibles en cada modelo para llevar a cabo los diferentes pasos de la modelación (estimación de la cantidad de cambio, relación entre las variables explicativas y los cambios, alocaión de los cambios, reproducción de los patrones espaciales, evaluación del desempeño del modelo, posibilidad de desarrollar modelos más sofisticados). En un paso siguiente, se aplicaron los modelos a un caso de estudio virtual, basado en un escenario de deforestación sencillo. Esta estrategia nos permitió comparar los modelos en situaciones controladas y desarrollar situaciones retadoras para evaluar su desempeño. Se compararon los diferentes productos de la modelación (mapas de probabilidad de cambio, mapas de coberturas simulados) y se evaluaron los modelos tomando en cuanto su flexibilidad y capacidad para llevar a cabo las diferentes tareas relacionadas con la modelación.

Palabras claves: modelado espacial, cambio de uso/cobertura del suelo, software

ABSTRACT

During the last decades, a diversity of models has been developed to model land use/cover changes (LUCC). In this study, we compared four modeling tools: CLUE-S, DINAMICA EGO, CA_MARKOV and Land Change Modeler (both available in IDRISI). As a first step, we assessed the methods and tools available for each program to carry out the steps necessary for modeling (estimating the quantity of change, assessing the relationship between explanatory variables and changes, spatial allocation of change, simulation of specific landscape patterns, assessing the model's ability to simulate LUCC and, capacity of sophisticated model development). As a

following step, models have been applied to a simple theoretical case study, based upon a simple deforestation scenario. This approach allowed comparing the models in controlled situations and developing challenging situations to evaluate their performance. The various products of modeling were compared and models were assessed taking into account their flexibility and capacity to carry out the different tasks involved in modeling. Keywords: spatially explicit modeling, Land use/cover change, software

INTRODUCCION

Los cambios de uso / cobertura del suelo (CUCS) están considerados entre las principales fuerzas que inciden sobre el cambio global. En las últimas décadas, una gran cantidad de modelos de CCUS han sido desarrollados para satisfacer las necesidades de gestión de la tierra, y para comprender, evaluar y proyectar el papel de los CUCS en el funcionamiento del sistema terrestre. La modelación, especialmente si se realiza de forma "espacialmente explícita", es una técnica importante para la proyección y la exploración de escenarios prospectivos alternativos, para llevar a cabo experimentos que ponen a prueba nuestra comprensión de los procesos clave, y para describir estos últimos en términos cuantitativos (Veldkamp y Lambin, 2001).

Los CUCS se modelan empíricamente mediante un análisis de los cambios pasados para desarrollar un modelo matemático que estima el potencial de cambio en función de un conjunto de variables explicativas. En general, el análisis espacial de los cambios anteriores se lleva a cabo a través de la comparación de dos mapas de cobertura/uso del suelo (CUS) de dos fechas diferentes. Esta comparación permite estimar los patrones y procesos de cambio (tipos de transiciones y tasas de cambio) y calibrar el modelo. Para el desarrollo de modelos de CUCS espaciales se necesitan mapas que indican el grado de susceptibilidad de cambio en el futuro. El análisis de los cambios pasados en relación con las variables explicativas permite mapear esta

susceptibilidad, también referida en la literatura como potencial, propensión, o probabilidad. Emplearemos el término de probabilidad aunque en algunos modelos estos valores no son probabilidades en el sentido estricto. Estos mapas de probabilidad por sí mismos pueden considerarse como un primer producto de la modelación. Otros procedimientos, aplicados con el fin de crear un mapa prospectivo de CUS, involucran técnicas para asignar la cantidad de ciertos cambios establecidos a través de la proyección de la cantidad de los CUCS históricos y, finalmente, para reproducir los patrones espaciales de los paisajes. Por último, una evaluación del desempeño del modelo se lleva usualmente a cabo. Esta se basa a menudo en la coincidencia espacial entre un mapa simulado y un mapa "observado" (generalmente obtenido a través de la clasificación de imágenes de satélite) que sirve de referencia.

Diferentes paquetes de modelación tienen funciones y herramientas que pueden ser una ventaja o desventaja según los datos de entrada disponibles y el propósito de la modelación. Aunque algunos modelos han sido ampliamente utilizados, existen muy pocos estudios enfocados a comprender los beneficios y limitaciones de los modelos mediante la evaluación y la comparación de sus herramientas. Este estudio tiene como objetivo la evaluación de cuatro modelos diseñados para la simulación espacial de los CUCS.

METODOS

Comparamos 4 modelos, que presentan un amplio abanico de enfoques y métodos:

-CA_MARKOV en IDRISI (Eastman, 2009; Paegelow y Camacho Olmedo, 2008).

-CLUE-S (Verburg y Overmars, 2009)

-DINAMICA EGO (Soares-Filho et al., 2002, 2006, 2009).

-Land Change Modeler (disponible en IDRISI y como extensión de ARC-GIS) (Eastman, 2009; Johnson, 2009; Pineda-Jaimes, 2009).

Se llevó a cabo una revisión de los métodos y herramientas que ofrece cada modelo para realizar la simulación teniendo en cuenta las principales tareas en la modelación espacial: 1) ¿Cómo el modelo calcula la cantidad de cambios? 2) ¿Cómo establece la relación entre las variables explicativas y los cambios a fin de evaluar la probabilidad de cambio, 3) ¿Cómo se asignan los cambios? 4) ¿Cómo se simula los patrones espaciales de los cambios? y por último 5) ¿Cómo se evalúa el modelo? También se examinó la posibilidad de desarrollar modelos más sofisticados, la facilidad de uso y la disponibilidad de materiales de apoyo.

En una etapa posterior, se aplicó cada modelo a un caso virtual, que consisten en un conjunto de datos creados por los autores con el propósito de la comparación. Esta estrategia permite realizar la modelación en condiciones controladas y ofrece la

posibilidad de elaborar situaciones con el fin de probar tareas específicas de la modelación. Los modelos fueron evaluados mediante una serie de criterios implicando un análisis de los resultados (proyección de las superficies de cambio, mapas de potencial de cambio, mapas prospectivos de CUS) y una evaluación de su flexibilidad y para cumplir las tareas de la modelación.

El caso virtual se inspira de casos reales de deforestación tropical e incluye dos mapas de CUS (con fecha de 2000 y 2003) y cuatro mapas explicativos (elevación, pendiente, distancia a las carreteras y distancia a los asentamientos). Tres categorías de CUS se distinguen para la simulación: 1) bosques, 2) pastizales y, 3) cultivos (figura 1). Durante el período 2000-2003, se observan sólo cuatro tipos de transición que presentan diferentes patrones espaciales. Los pastizales y la agricultura están asociados a pendientes suaves y a la proximidad de las carreteras y los asentamientos, respectivamente, pero estas dos últimas variables están fuertemente correlacionadas. Por último, el efecto de diversas variables no es la suma de los efectos de cada variable: Por ejemplo, la deforestación no ocurre en pendiente suave en lugares remotos o en pendientes fuertes cerca de las carreteras, sino en lugares que combinan pendientes moderadas y proximidad a las carreteras o los asentamientos. Los pastizales se amplían principalmente por expansión de parches ya existentes y forman grandes extensiones mientras que la transición hacia agricultura se realiza a través de la creación de nuevos pequeños parches.

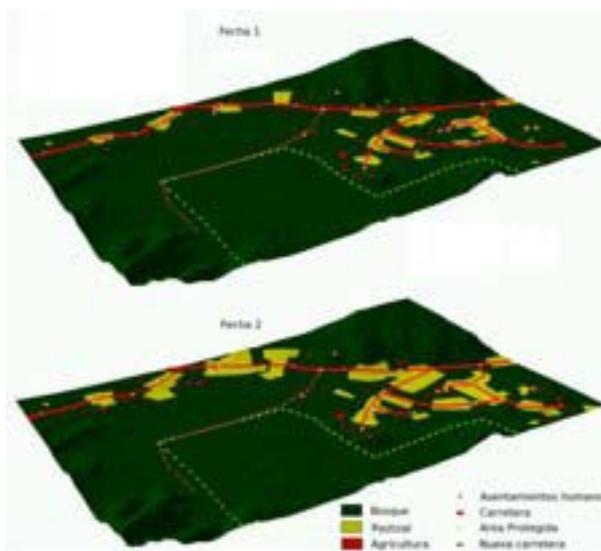


Figura 1 - Mapas de CUS para 2000 y 2003 (caso virtual)

RESULTADOS

Revisión de los modelos

El procedimiento de modelación puede ser subdividido en cinco pasos: 1) un procedimiento no espacial que calcula la cantidad de cada transición, 2) un procedimiento espacial que determina la probabilidad de cambio, 3) un componente espacial que asigna los cambios, 4) un módulo espacial que reproduce los patrones del paisaje y, por último, 5) un procedimiento de validación que permite comparar el mapa simulado con el mapa de referencia de la misma fecha. En la siguiente sección, se describen los métodos y herramientas que ofrece cada modelo para lograr cada una de estas tareas. A continuación, se presentan los parámetros de configuración avanzada y algunas consideraciones adicionales.

Estimación de la cantidad de cambios

En CA_MARKOV, DINAMICA y LCM, la cantidad de cambios se calcula con base a una matriz de Markov obtenida generalmente a través de la comparación de mapas de CUS de dos fechas. La matriz de transición entre la fecha de t_0 y t_1 (que determinan el periodo T) se obtiene mediante la superposición de los dos mapas de CUS de las mismas fechas. Se obtiene la superficie (o el número de píxeles) para cada transición. La matriz de transición puede ser transformada en una matriz de probabilidad de transición que permite hacer proyecciones a uno o varios periodos T (fecha $t_1 + T$). Sin embargo, a menudo es conveniente utilizar un tiempo determinado diferente del plazo T original para la proyección. Por ejemplo, el período de tiempo entre los dos mapas LUC utilizados para calibrar el modelo son típicamente varios años y el modelo se ejecuta con un intervalo de tiempo al año.

En DINAMICA, la matriz de transición se transforma para dar las tasas anuales de transición a fin de proyectar las tendencias de cambio sobre una base anual aplicando una ecuación de cálculo matricial (ver Soares-Filho et al., 2002 para más detalles). En IDRISI (CA_Markov y LCM), las probabilidades de transición anuales se obtienen realizando un ajuste basado en una regresión entre las probabilidades de transición de las matrices de periodos múltiples del periodo original T . IDRISI propone además una corrección de los valores de probabilidad de la matriz que toma en cuenta la fiabilidad de los mapas de CUS. En CLUE, la cantidad de categorías de ocupación del suelo es proporcionada por el usuario para cada año simulado. Se puede obtener a través de una gran variedad de enfoques (simples extrapolaciones de tendencias, proyecciones de Markov, modelos económicos...), pero deben ser evaluados mediante herramientas externas.

Evaluación de la probabilidad de cambio

Se espera que los CUCS ocurran en las áreas más propensas al cambio. La probabilidad de cambio depende de la distribución de las características biofísicas y socio-económicas. Las variables

explicativas más comúnmente utilizadas son la pendiente, la distancia a las carreteras y los asentamientos, la tenencia de la tierra y los tipos de suelo entre otros. La probabilidad de cambio de una transición dada puede ser evaluada a través de dos enfoques ligeramente diferentes: la aptitud de una ubicación para un determinado uso / cobertura del suelo resultante de la transición o bien la probabilidad de presentar esta transición.

CLUE y CA_Markov usan mapas que expresan la aptitud de una área para cada una de las categorías de CUS. DINAMICA y LCM calculan la probabilidad de cada transición. Ambos tipos de mapas se elaboran mediante el establecimiento de una relación entre las variables explicativas y los tipos de CUS o de transición. En CA_Markov los mapas de aptitud son generados por una evaluación multicriterio, para la cual se puede utilizar algunas de las herramientas ofrecidas por IDRISI. CLUE utiliza modelos de regresión logística que deben elaborarse en un programa separado. DINAMICA calcula un mapa de probabilidad utilizando el método de los pesos de evidencia. Estos pesos pueden eventualmente ser modificados mediante un algoritmo genético para mejorar el ajuste entre los mapas de probabilidad de cambio y el mapa de CUCS utilizado para la calibración del modelo. LCM utiliza una red neural (perceptrón multicapa) para producir el mapa de probabilidad. Presenta también la opción de utilizar una regresión logística.

Estos métodos implican diferentes supuestos y pre-procesamiento de las variables explicativas. Los modelos de regresión logística y de los pesos de evidencia se basan en la hipótesis de la independencia entre las variables explicativas. A menudo, este supuesto no se cumple. Para ello, estos paquetes disponen de herramientas para evaluar la correlación entre los mapas (coeficiente de Cramer, Chi cuadrado, correlación y Kappa en IDRISI, Cramer, contingencia e incertidumbre de información común en DINAMICA). Los pesos de evidencia se basan en variables categóricas y DINAMICA tiene una herramienta para optimizar la transformación de variables continuas en categóricas. Por el contrario, el perceptrón multicapa y los modelos de regresión logística utilizan variables de preferencia continuas. IDRISI permite convertir mapas categóricos en mapas continuos mediante la transformación de la evidencia de probabilidad basado en la frecuencia relativa de los píxeles que pertenecen a las diferentes categorías dentro de las áreas de cambio.

Estos métodos ofrecen también diferentes grados de integración de conocimiento experto y de aptitud para ajustar la relación entre las variables explicativas y la probabilidad de transición. La evaluación multicriterio (CA_Markov) permite tomar en cuenta el conocimiento de expertos mientras que la regresión logística y aún más las redes neuronales o los algoritmos genéticos no. DINAMICA permite visualizar la relación entre las variables explicativas y los pesos de evidencia y, finalmente, editar (modificar) sus valores. Por lo tanto, es posible ajustar

el nivel de integración del conocimiento experto desde un enfoque totalmente estadístico (sin modificar los valores de los pesos calculados de forma automática) a un enfoque completamente basado en conocimiento experto (modificación importante de los pesos por los expertos).

Los métodos también difieren en su flexibilidad para modelar las relaciones entre la probabilidad de cambio y las variables explicativas. Modelos de regresión logística no podrán modelar correctamente una función diferente de una sigmoidea. En el método de los pesos de evidencia, se calcula un peso para cada categoría, lo que permite elaborar una función compleja. Estos dos enfoques se basan en un efecto aditivo de las variables explicativas. Por el contrario, las redes neuronales y los algoritmos genéticos permiten manejar funciones no lineales, teniendo en cuenta las sinergias o efectos inhibitorios entre las variables. Estos dos últimos enfoques pueden por lo tanto ajustarse mejor a una función entre las variables explicativas y los posibles cambios. Sin embargo, la capacidad para modelar funciones complejas con una alta capacidad de ajuste no es necesariamente una ventaja, ya que puede conducir a un sobre-ajuste. Por ejemplo, Mas et al. (2004) encontraron que las redes neuronales más complejas permite un mejor ajuste durante el período de calibración, pero no en la predicción del cambio en el período siguiente. Pérez-Vega et al. (2012) reportaron que el principal problema para producir mapas prospectivos en una región de bosque tropical seco se debió a las diferencias entre las tasas y los patrones espaciales de cambio durante los períodos de calibración y de simulación.

Asignación del cambio

La asignación del cambio es un proceso de decisión que selecciona los píxeles que van a experimentar cierto cambio con base en los mapas de probabilidad de cambio. En el supuesto de que los píxeles que cambian son los que tienen la mayor probabilidad, CA_MARKOV y LCM seleccionan los píxeles con los valores de probabilidad más altos. Debido a que hay normalmente una competencia entre diferentes transiciones (el mismo sitio puede ser candidato a transiciones diferentes), CA_Markov y LCM utilizan un procedimiento de asignación multi-objetivo. CLUE utiliza un enfoque alternativo basado en un proceso iterativo. DINAMICA utiliza dos funciones de autómatas celulares que se describen más adelante. Los píxeles son ordenados de acuerdo a su potencial de cambio y son seleccionados al azar de mayor a menor potencial. Un parámetro permite controlar la cantidad de cambios simulados en áreas menos propensas al cambio.

Reproducción de los patrones temporales y espaciales

CA_MARKOV y DINAMICA utilizan autómatas celulares (AC) con el fin de obtener un efecto de proximidad (áreas cercanas a parches existentes de una cierta categoría son más propensas a cambios hacia esta categoría). En CA_MARKOV, el AC reduce

la aptitud de las áreas alejadas de áreas existentes de la categoría de CUS considerada usando un filtro de 5x5 píxeles. El usuario puede controlar el número de iteraciones del AC y por lo tanto el efecto de la aglomeración en torno a los parches ya existentes o de nueva creación. En ambos programas el mismo AC se aplica a todas las transiciones. DINAMICA utiliza dos AC complementarios: 1) el expandir, y 2) el parcher. El primero se dedica únicamente a la expansión o contracción de los parches anteriores de una determinada categoría. El segundo está diseñado para generar nuevos parches a través de un mecanismo de siembra. El usuario puede ajustar parámetros para controlar el tamaño de los parches, la variación del tamaño y la isometría para cada transición por separado. CLUE y LCM no tienen AC. Sin embargo, CLUE presenta la opción de modificar el mapa de probabilidad utilizando una regresión logística adicional que tome en cuenta la distancia a los parches existentes a través de filtros espaciales.

Características adicionales diseñadas para reproducir patrones espacio-temporales incluyen la posibilidad de modelar el tiempo de permanencia durante las transiciones, efectos de la saturación y el uso de variables dinámicas. DINAMICA permite cambiar la matriz de Markov en los pasos específicos de la simulación. Algunas transiciones como bosque secundario a bosque maduro son deterministas y dependen del tiempo de permanencia de la sucesión vegetal. Sólo CLUE y DINAMICA permiten establecer un tiempo de permanencia de cada transición. Algunas transiciones se detienen cuando la cantidad de cambio alcanza un determinado nivel. Por ejemplo, un frente de deforestación se moverá hacia delante dejando una cierta cantidad de fragmentos de bosque remanentes. En CA_MARKOV y DINAMICA, procedimientos para controlar los tiempos de estancia y el efecto de saturación pueden ser fácilmente implementados. Debido a su estructura fija, dicha aplicación no es posible en LCM. En CLUE, el efecto de saturación se puede modelar a expensas de otro patrón espacial porque el usuario puede utilizar sólo una regresión logística adicional por cada transición.

El uso de zonas de restricción o incentivo permite ajustar el cambio potencial a determinadas políticas de ordenación que no se pueden derivar de las variables explicativas. LCM y DINAMICA permitir el uso de zonas de restricción o de incentivo a un cierto paso de tiempo. En CLUE, estas áreas se crean mediante el suministro de un mapa con los valores de los píxeles entre 0 y 1, de modo que sean compatibles con los resultados de la regresión, pero sólo para la simulación completa (todos los pasos de tiempo). En CA_Markov, la incorporación de las zonas de restricción o incentivo puede hacerse a través de la elaboración de mapas de aptitud que tomen en cuenta estas áreas.

Modelo de evaluación

En general, la evaluación de los mapas de CUS prospectivos se basa en la comparación entre el

mapa simulado y un mapa observado. IDRISI ofrece dos formas de evaluar los resultados de la simulación: 1) el índice Kappa (Pontius, 2000) y 2) el análisis ROC. DINAMICA permite calcular un índice de similitud difuso (Hagen, 2003). En CLUE, la evaluación de las regresiones logísticas se basa generalmente en un análisis ROC, pero esto tiene que llevarse a cabo en otro programa.

Opciones avanzadas

La elaboración de modelos más sofisticados involucra el manejo de sub-regiones que pueden presentar diferentes dinámicas (por ejemplo, diferentes tasas de cambio, diferentes tipos de transición, diferentes variables explicativas y/o efecto diferente de las mismas variables). En CLUE el usuario puede proporcionar un mapa de las regiones. DINAMICA también tiene la opción de dividir el área de estudio en regiones con especificaciones particulares. Sólo DINAMICA es capaz de subdividir el modelo en sub-regiones que interactúan entre ellas (por ejemplo, la proximidad de un frente de la deforestación en una sub-región puede influir en la deforestación en las sub-regiones vecinas).

Otro aspecto es la integración de diferentes patrones de CUCS en el tiempo. Esto puede hacerse fácilmente con DINAMICA que permite la sustitución de las matrices de transición, junto con las variables explicativas en un momento dado de la simulación. El modeler de IDRISI puede utilizarse para llevar a cabo tales procedimientos de modelado utilizando CA_Markov. LCM permite cambiar algunas variables durante el modelado (carreteras, infraestructura e incentivos previstos / limitaciones) en el paso del tiempo. LCM puede utilizar una matriz de transición fija de un modelo exterior en lugar de la matriz de Markov. DINAMICA puede utilizar un modelo externo, que calcula las tasas de dinámica de transición.

Con el fin de reproducir los patrones espaciales de deforestación tropical, donde la red de carreteras es un fuerte predictor de la deforestación, pero no existe cartografía de los caminos "espontáneos", DINAMICA y LCM ofrecen un modelo predictivo de la evolución de las carreteras. Además LCM proporciona herramientas destinadas a evaluar el impacto del cambio para la sostenibilidad ecológica y la planificación de la conservación. DINAMICA proporciona algunas herramientas adicionales para modelar los volúmenes de madera procesada por los aserraderos y de CO₂.

Consideraciones adicionales

Los programas que ofrece más flexibilidad para desarrollar modelos personalizados son CA_Markov y DINAMICA. Los modelos pueden ser construidos aprovechando la gran cantidad de herramientas y operadores disponibles en estos programas. Por otra parte, la programación es fácil, incluso para usuarios sin experiencia previa en programación, gracias a una interfaz gráfica amigable. Al contrario, LCM y CLUE presentan una estructura rígida, que define un flujo fijo de procedimientos. Esto puede ser ventajoso

para nuevos usuarios ya que los procedimientos están bien definidos y documentados, pero se convierte en una desventaja cuando se quiere desarrollar modelos hechos a medida.

La facilidad de uso depende de las características que hacen más fácil emplear una herramienta y de la documentación ofrecida al usuario. Los programas de IDRISI (CA_MARKOV y LCM) son tal vez los más fáciles de usar porque: 1) están bien documentados (manual y tutorial), 2) todas las operaciones se pueden ejecutar en un entorno gráfico, pero también se puede automatizar a través de la secuencia de comandos y de herramientas de programación y 3) las operaciones previas a la modelación (clasificación de imágenes para crear mapas de CUS por ejemplo) puede llevarse a cabo en el mismo entorno. DINAMICA también presenta una interfaz de programación intuitiva y recientemente ha sido muy bien documentado (manual de instrucciones, lista de discusión). CLUE también está bien documentada (guía y una gran cantidad de publicaciones científicas), pero requiere algunas operaciones laboriosas (edición de archivos de texto para introducir los parámetros) y muchas operaciones tienen que llevarse a cabo con programas externos (regresión logística, despliegue de los mapas, evaluación). IDRISI permite importar y exportar una gran cantidad de formato de imágenes, DINAMICA maneja los formatos ERMapper, GeoTIFF y Arcview ASCII mientras CLUE sólo acepta archivos ASCII.

Todos los paquetes examinados son gratuitos, excepto IDRISI que es relativamente económico (US\$ 675 por una licencia académica). Sin embargo, IDRISI es un software de SIG y de procesamiento de imágenes muy completo. DINAMICA e IDRISI están actualizados de forma regular mientras que CLUE tiene la misma versión desde 2002.

Aplicación al caso virtual

Los cuatro paquetes fueron aplicados al caso virtual. La superposición de los dos mapas de CUS 2000 y 2003 permitirá crear una matriz de transición que representa cuatro transiciones de cambio: 1) bosques a pastizales, 2) bosques a agricultura, 3) agricultura a bosques y, 4) agricultura a pastizal (tabla 1). En la tabla 2, se puede observar que las matrices generadas por DINAMICA e IDRISI (sin correcciones) son muy similares). Al contrario, la corrección realizada por IDRISI con el fin de corregir el sesgo relacionado con errores cartográficos modifica todas las probabilidades de transición y el usuario tiene que asegurarse de que estos valores son realistas ya que la utilización de esta corrección modifica las proyecciones de manera muy importante (Figura 2). En este caso, después de esta corrección, ciertas transiciones que no se observaron (pastizales a bosques y pastizales a la agricultura) presentan una probabilidad de 7,5%.

2003			
2000	Bosque	Pastizal	Agricultura
Bosque	243971	47265	3385
Pastizal	0	40628	0
Agricultura	2909	961	259

Tabla 2 – Matrices de probabilidad de transición IDRISI (sin corrección del error)

2003			
2000	Bosque	Pastizal	Agricultura
Bosque	0.9692	0.0244	0.0064
Pastizal	0.0000	1.0000	0.0000
Agricultura	0.3923	0.0647	0.5430

IDRISI (con corrección correspondiente a un error de 15%)

2003			
2000	Bosque	Pastizal	Agricultura
Bosque	0.8238	0.1396	0.0366
Pastizal	0.0750	0.8500	0.0750
Agricultura	0.4622	0.0763	0.4616

DINAMICA

2003			
2000	Bosque	Pastizal	Agricultura
Bosque	0.9712	0.0244	0.0043
Pastizal	0.0000	1.0000	0.0000
Agricultura	0.2660	0.0518	0.6822

Tabla1: Matriz de transición 2000-2003 en número de píxeles

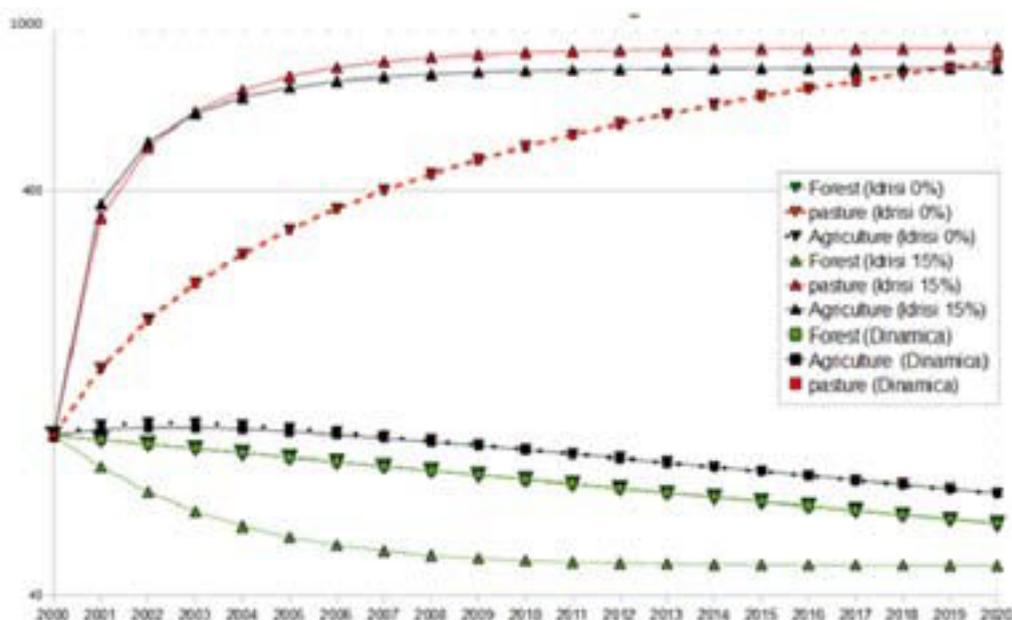


Figura 2 – Proyecciones de las superficies de las 3 categorías con base en las tres matrices

Mapeo de la probabilidad de cambio

Los mapas de probabilidad de cambio y de aptitud generados por los diferentes paquetes presentan algunas diferencias que se reflejan en la relación entre probabilidad de cambio y variables explicativas

(Figura 3). De la misma manera, los mapas prospectivos son también muy diferentes, solo los AC de DINAMICA lograron reproducir los pequeños parches de agricultura (Figura 4).

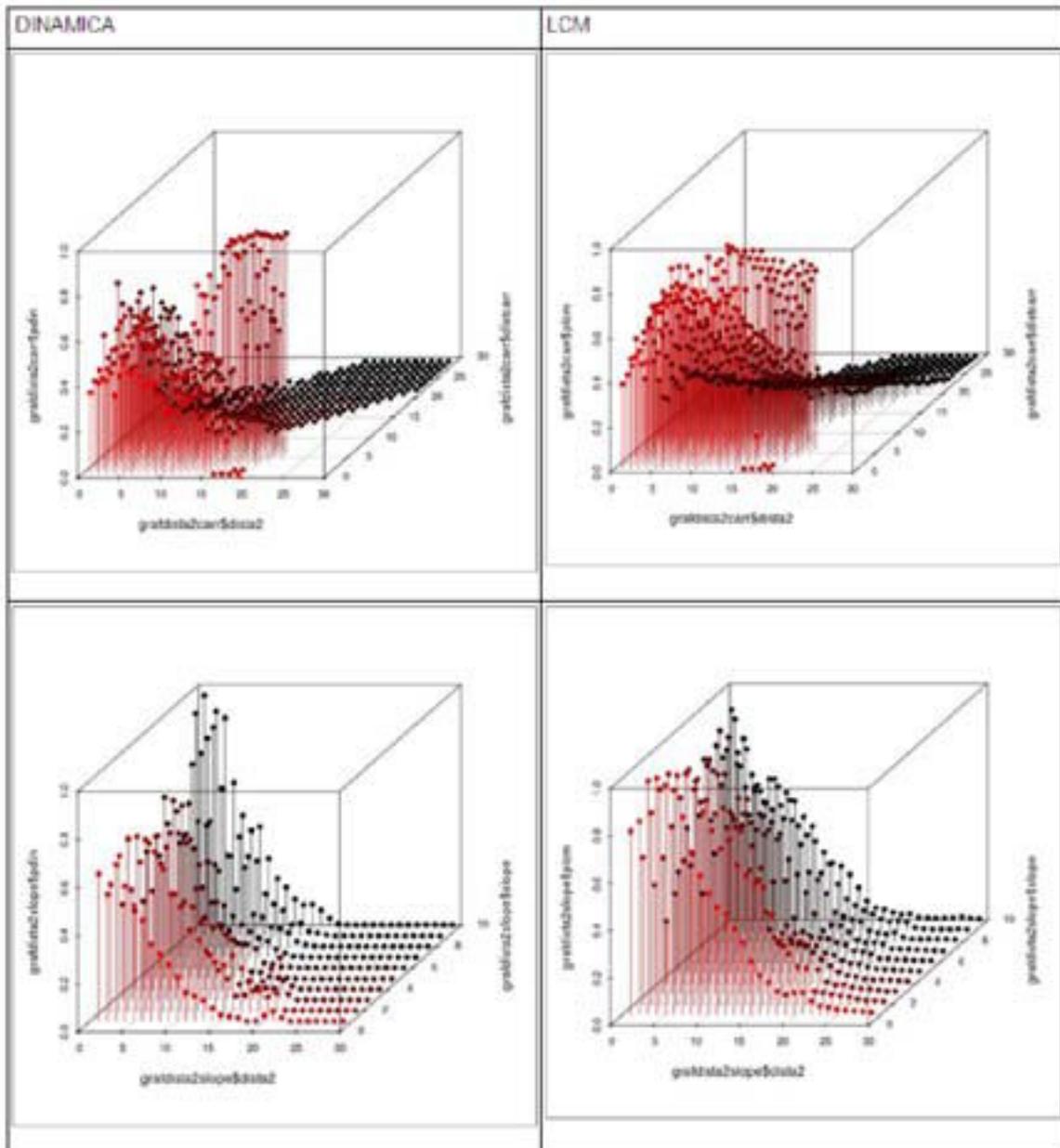


Figura 3 – Probabilidad de la transición “Bosque a pastizal” en función de las variables explicativas en DINAMICA y LCM

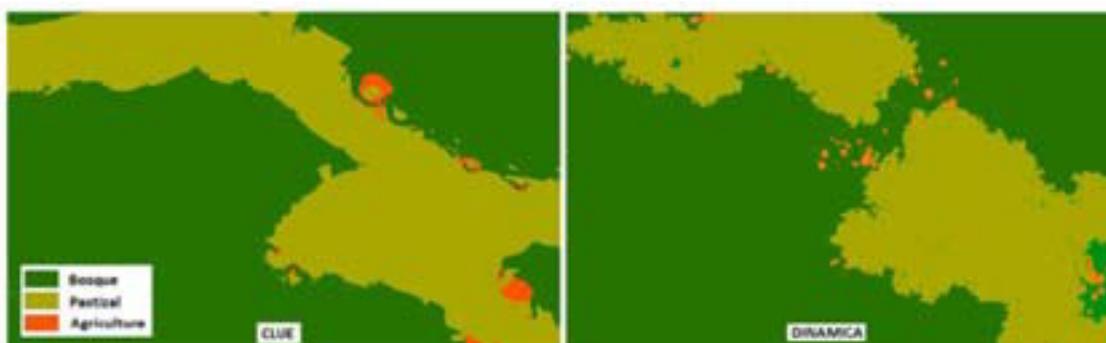


Figura 4 – Mapas prospectivos (2015) generados por CLUE y DINAMICA

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

Los paquetes revisados utilizan diferentes enfoques para producir mapas prospectivos. Algunos se basan en los datos con métodos de calibración automáticos (LCM) mientras otros se basan más en conocimiento experto (CA_Markov). DINAMICA permite escoger niveles intermediarios entre ambos enfoques.

Por lo menos en caso de regiones con altas dinámicas de CCUS, los enfoques de calibración basados en métodos capaces de producir funciones que se ajustan mucho a los datos de entrenamiento (redes neurales, algoritmos genéticos) pueden resultar contraproducentes debido a las variaciones en los patrones de cambio durante el tiempo. En estos casos, la integración de algún grado de conocimiento experto parece recomendable.

Los modelos pueden producir dos tipos de salida: mapas de probabilidad de cambio y mapas prospectivos de CUS. Para estos últimos, el uso de autómatas celulares permite reproducir los patrones del paisaje, lo cual puede ser importante por ejemplo para evaluar el impacto de los CCUS sobre la fragmentación de los paisajes y la conservación de la biodiversidad. Sin embargo, los AC, excepto los de

DINAMICA, no lograron reproducir estos patrones. En CA_Markov se podrían realizar operaciones adicionales para mejorar este aspecto.

Finalmente, el interés de estos modelos es la posibilidad de desarrollar modelos que se adecuen a las necesidades del usuario y de acoplarlos con otros modelos (modelos económicos, emisión de carbono, conservación de especies, modelos hidrológicos...). LCM tiene módulos para evaluar aspectos de conservación. Sin embargo, su estructura rígida no permite salir del entorno ya establecido. En este aspecto es sin duda DINAMICA que presenta más potencial por su gran flexibilidad y sus posibilidades de interacción.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó en el ámbito del proyecto Simulaciones geomáticas para modelizar dinámicas ambientales. Avances metodológicos y temáticos (BIA2008-00681) y Elaboración y Aplicación de modelos prospectivos de cambio de cobertura/uso del suelo (PAPIIT clave IN113511).

REFERENCIAS

- Eastman, R., 2009, Idrisi Taiga, Guide to GIS and Image Processing, manual version 16.02, Clark University, 342 p.
- Hagen, A., 2003, Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. *International Journal of Geographical Information Science*, 17(3), 235–249.
- Johnson, S., 2009, An evaluation of Land Change Modeler for ArcGIS for ecological analysis of landscape composition. Master of Science (Department of Geography) (GIScience Specialization). <http://gradworks.umi.com/14/65/1465027.html>
- Mas, J.F., Puig, H. Palacio, J.L., Sosa, A.A., 2004, Modelling deforestation using GIS and artificial neural networks., *Environmental Modelling and Software*, 19(5)461-471.
- Paegelow M., Camacho Olmedo M.T. (coord.), 2008, Modelling Environmental Dynamics. Advances in geomatic solutions. Springer, series: Environmental Science and Engineering, 390 p.
- Paegelow, M., M.T. Camacho Olmedo, 2005, Possibilities and limits of prospective GIS land cover modelling - a compared case study: Garrotxes (France) and Alta Alpujarra Granadina (Spain). *International Journal of Geographical Information Science* 19(6): 697-722.
- Pérez-Vega, A., J.F. Mas, A. Ligmann-Zielinska, 2012, Comparing two approaches to land use/cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest, *Environmental Modelling & Software*, 29(1): 11–23.
- Pineda Jaimés, N.B., Bosque Sendra, J., Gómez Delgado, M., Plata Rocha, W., 2009, Análisis de cambio de uso del suelo en el estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regression multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación, 69:33-52.
- Pontius, R.G., 2000, Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 66(8): 1011-1016.
- Soares-Filho B. S.; Nepstad, D.; Curran, L.; Voll, E.; Cerqueira, G.; Garcia, R. A.; Ramos, C. A.; McDonald, A.; Lefebvre, P.; Schlesinger, P., 2006, Modeling conservation in the Amazon basin. *Nature*, London, 440: 520-523.
- Soares-Filho B.S.; Pennachin, C. L.; Cerqueira, G., 2002, DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*, 154(3): 217 – 235.
- Soares-Filho, B.S., H. O. Rodrigues W. L. S. Costa, 2009, Modelamiento de Dinámica Ambiental con Dinamica EGO, Centro de Sensoriamento Remoto/Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Brazil. Disponible en <http://www.csr.ufmg.br/dinamica/>
- Veldkamp, A. y Lambin, E., 2001, Predicting land-use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85: 1-6.
- Verburg, P.H. y Overmars, K.P., 2009. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. *Landscape Ecology* 24(9): 1167-1181. <http://dx.doi.org/10.1007/s10980-009-9355-7>

Evolución espacio-temporal del glaciario cuaternario: Caso Parque Nacional Sierra Nevada, Venezuela

Santiago Yépez (1), Eduardo Carrillo (2)

- (1) Fundación Instituto de Ingeniería para Desarrollo Tecnológico (FIIDT), Centro de Procesamiento Digital de Imágenes (CPDI). Ing. Geólogo, MSc. - syepez@fii.gob.ve , Telf. +58-212-9034681, Apartado Postal 40200
(2) Instituto de Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela.

RESUMEN

Los Andes de Mérida son una cordillera situada en Venezuela entre los 8° y 10° de latitud norte, alcanzando los 4981 m de altura en el pico Bolívar. Evidencias geomorfológicas muestran que durante el Pleistoceno los glaciares alcanzaron por lo menos 600 km² por encima de los 2600 m de altitud, coincidiendo al mismo tiempo, con importantes pulsos tectónicos regionales. Hoy en día, sólo una pequeña capa de hielo cubre los picos Humboldt-Bompland y Bolívar, mientras que siete glaciares han desaparecido durante los últimos setenta años. Dos principales mapas de cobertura glaciario fueron hechos en 1910 y 1952 (Jahn, 1921; Schubert, 1975) mostrando una fuerte reducción de la superficie de 10 km² a 2.91 km² en la primera mitad del siglo 20. El estudio se enfoca en analizar la evolución anual a decenal de la capa de hielo mediante el análisis multitemporal y multispectral de imágenes de los satélites SPOT-5. La metodología está orientada principalmente al uso de herramientas espectrales como el método de Índice de Diferencia Normalizada de Hielo y Nieve (NDSI), a su vez que se explota el potencial de los métodos de visualización espacial 3D en la plataforma ArcScene de ESRI, para monitorear las coberturas glaciares. Los resultados preliminares muestran que el total de la capa de hielo/nieve del glaciario Sinigüis en 2009 fue de 0.24 km², con una pérdida de superficie de 31.4 m²/año desde 1952, mientras que para el glaciario Espejo en el pico Bolívar se obtuvo una extensión de 0.071 km², lo que representa una pérdida de 1.91 m²/año, desde el estudio de Schubert en 1952. Sin embargo, el balance de masa y de energía en las capas de hielo, así como el comportamiento ante la variabilidad climática, aún es desconocido. Así, el futuro nos impone un desafío en el análisis glaciológico y de geología cuaternaria, en uno de los pocos glaciares que tiene influencia del Caribe, desde el Pleistoceno hasta su inminente extinción.

Palabras clave: Multi-temporal, Multi-espectral, SPOT, Glaciario, Balance de Masa, Variabilidad Climática

ABSTRACT

The Mérida Andes is a range located in Venezuela between 8° and 10° north latitude, rising at 4981 m high at the Bolívar Peak. Geomorphologic evidences shows that during the Pleistocene, the glaciers reached at least 600 km² above 2600 m altitude, while coinciding with major regional tectonic pulses. Today, only a small ice-cap covers the peaks Bolívar and Humboldt-Bompland, whereas seven glaciers have disappeared during the last seventy years. Two main ice-cover maps were made in 1910 and 1952 (Jahn, 1921, Schubert, 1975) showing a strong area reduction of 10 km² to 2.91 km² in the first half of the 20th century. This study focuses on the annual-decennial evolution of the ice-caps by analyzing multitemporal and multispectral data, coming from SPOT-5 satellite images. The methodology is oriented to the use of tools such as the spectral index method called Normalized Difference Snow and Ice (NDSI), besides enhanced the potential of 3D spatial visualization methods in the ArcScene extension of ESRI platform for monitoring ice-covers. The preliminary results showed that total ice-cover on Sinigüis glacier was 0.24 km² in 2009, with a loss of 31.4 m²/year of area since 1952, while for the Espejo Glacier in the Bolívar Peak was 0.071 km², which represents a loss of 1.91 m²/year from the study of Schubert in 1952. However, the mass balance and energy in the ice-cover, and the behavior due to the climate variability is still unknown. Thus, the future set us the challenge of glaciological and quaternary geology analysis, in order to improve the understanding of evolution of one of the few glaciers with Caribbean influenced, from the Pleistocene until its imminent extinction.

Keywords: Multi-temporal, Multi-spectral, SPOT, Glacier, Mass balance, Climate variability

INTRODUCCIÓN

Los sensores remotos en los últimos años se han convertido en una importante herramienta para estudiar la evolución espacio-temporal de los glaciares a nivel mundial. A través del análisis multi-

temporal en imágenes satelitales, se puede estudiar la evolución de los glaciares y recolectar datos de gran importancia para determinar la influencia de los procesos de cambio climático sobre estos.

Las técnicas más usadas para el cálculo de cobertura glaciar, a partir de imágenes de satélite, son las clasificaciones, cocientes e índices entre bandas espectrales, técnicas que toman ventaja de la respuesta espectral del hielo y la nieve, al resaltarse las características de absorción y reflectancia propias de estos elementos en sus firmas espectrales.

Esta investigación forma parte de la continuación de un estudio realizado en el 2008 (Carrillo & Yépez, 2008) en el Parque Nacional Sierra Nevada, donde se hizo un análisis espectral sobre el glaciar Sinigüis en los picos Humboldt y Bompland. Con la adquisición de una nueva imagen satelital SPOT-5 en enero del 2009 (Fig. 1), surge la idea de continuar el monitoreo y extender el análisis al resto de los glaciares dentro del parque, una de las ventajas es que esta nueva imagen muestra un porcentaje bastante bajo de cobertura de nubes, lo que representa una gran oportunidad en estudios de este tipo, debido a la alta nubosidad que domina el área.

El origen de esta cordillera se encuentra estrechamente relacionado a la tectónica del Caribe cuyo levantamiento se estima que comienza a principios del Mioceno Temprano con una tasa de exhumación calculada entre 0.2 a 0.6 km/m.a. (Bermudez-Cella et al., 2008). Actualmente, el sistema de fallas rumbo deslizantes de Boconó, la estructura activa más importante de la cordillera con una extensión de más de 500 km, controla la geomorfología del eje central de la cordillera (Rod, 1956). Sin embargo, existen evidencias geomofológicas claras de que durante la glaciación Winsconsin la línea de nieve bajó hasta los 2600 m y los glaciares tuvieron un impacto importante sobre aproximadamente 600 km² en los páramos de Sierra Nevada y Batallón (Schubert, 1979), lo que se denominó localmente Glaciación Mérida (Schubert, 1974). En gran medida la dinámica glaciar del

Pleistoceno ha sido la responsable tanto de la producción de sedimentos como de la erosión cuaternaria en la cordillera de Mérida y la comprensión de esta dinámica es fundamental para comprender la respuesta de los glaciares tropicales ante cambios climáticos conocidos.

A pesar de que los glaciares en la cordillera de Mérida cubrieron gran parte de sus cumbres, es poco lo que se conoce sobre su evolución durante el Cuaternario. Las primeras observaciones más relevantes se remontan al siglo XIX (e.g. Goering, 1962 y Sievers, 1886) donde se hacen descripciones sobre la morfología y alcance de los glaciares para entonces. Jahn (Jahn, 1912 ; 1925 y 1931) presenta las primeras mediciones planimétricas de cada uno de los glaciares existentes para entonces, que más tarde Schubert (Schubert, 1980) resumiría en los Glaciares del Pico Bolívar, Glaciares del Macizo La Concha y Glaciares del Macizo Humboldt-Bompland. El trabajo de Jahn, en particular Jahn (1925), lleva a la primera cartografía e inventario glaciológico de Venezuela. El área de cobertura fue estimada para entonces en 10 Km² y se presentan por primera vez registros fotográficos que permitirán una comparación gráfica de su evolución durante el siglo XX (Schubert, 1992). Para 1952, la cobertura glacial en la Sierra Nevada Mérida apenas cubrían cerca de 3 km² evidenciando un importante retroceso durante el último siglo (Schubert, 1980).

Una extensa y detallada recopilación bibliográfica de las observaciones glaciológicas en Venezuela en los últimos siglos, es presentada por Schubert (Schubert, 1972; 1980; 1984; 1992 y 1998) de lo que se puede destacar el énfasis en observaciones fotográficas e históricas donde siempre se alerta sobre el importante retroceso del área de cobertura de los glaciares Merideños. Más recientemente el glaciar Sinigüis que cubre la ladera norte de los picos Bompland y Humboldt fue observado por Morris (Morris et al., 2006) mediante imágenes ASTER quienes calcularon una extensión de 0.29 Km² para el año 2004.

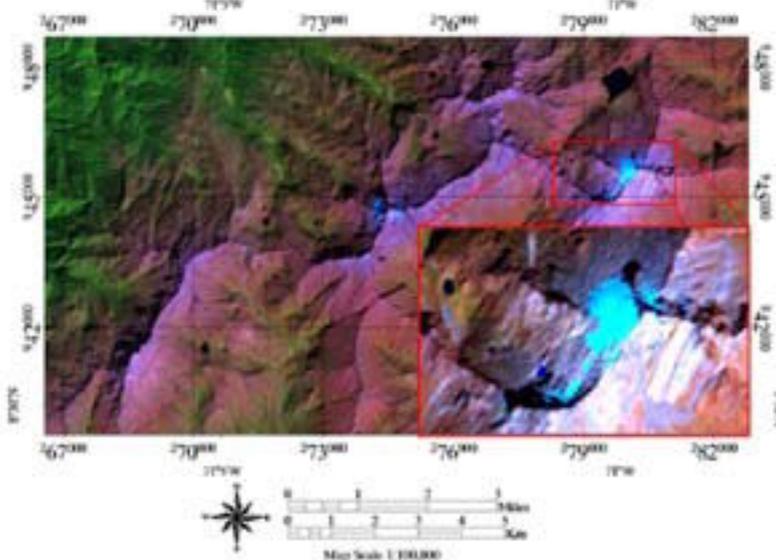


Figura 1: Imagen del satélite SPOT-5 tomada durante el mes de enero del 2009 sobre el Parque Nacional Sierra Nevada. Vista aumentada del glaciar Sinigüis en los picos Humboldt y Bompland

METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS ESPECTRAL DE LOS DATOS SPOT-5

Previo al análisis espectral de las imágenes SPOT-5 es necesario realizar un pre-procesamiento a la imagen satelital, esta preparación de los datos involucra una serie de pasos:

La emulación de los parámetros orbitales para preservar la información de la geometría de vista de la escena y los coeficientes RPC (por sus siglas en inglés: Rational Polynomial Coefficients) del archivo original, esto con la finalidad de que cuando se procese la imagen, el producto de este procedimiento resguarde en su metadata la información orbital, información necesaria para el último proceso que consiste en la ortorectificación.

La calibración radiométrica en los datos SPOT-5, está relacionada a la conversión de los niveles digitales a unidades de radianza o energía en $Wm^{-2} sr^{-1}$, casi todos los sensores captan la energía electromagnética reflejada de la superficie como registros eléctricos, los cuales posteriormente son codificados en un código binario. Es necesario al procesar una imagen hacer la conversión de estos niveles digitales a la cantidad de energía que recibió en sensor al momento de la toma de la escena, este valor se conoce como radianza.

Seguido de este procedimiento, continúa la

corrección atmosférica que nos es más que la eliminación de las alteraciones y contribuciones atmosféricas en el registro de la imagen. Para esto se utilizó el módulo FLAASH (por sus siglas en inglés: Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) del programa ENVI 4.x. Este módulo modela las condiciones atmosféricas al momento de la toma de la escena y sustrae estas alteraciones al registro de la imagen, obteniéndose valores en unidades de reflectancia aparente.

Finalmente, se procede con el proceso de ortorectificación, en el cual se utilizó el modelo de elevación digital del proyecto SRTM (por sus siglas en inglés: Shuttle Radar Topography Mission) a 3 arco segundo, remuestreado a aproximadamente 30 m de resolución espacial. Este procedimiento permite eliminar las distorsiones producidas por errores geométricos tales como: variación del tamaño de píxel, paralaje, desplazamientos en las direcciones fila-columna, etc. El proceso aminora estos errores de manera efectiva y permite obtener una imagen que representa la realidad del terreno de acuerdo a unas especificaciones cartográficas previamente definidas. En la figura 2 se puede observar de manera sistematizada el flujograma del pre-procesamiento inicial necesario a aplicarse a las imágenes SPOT-5:



Figura 2: Flujograma del pre-procesamiento de la imagen SPOT-5

Para el análisis espectral se decidió continuar con la aplicación del método de Índice de Diferencia Normalizada de Hielo y Nieve NDSI (por sus siglas en inglés: Normalized-Difference Snow Index, Hall et al., 1995). Esto con la finalidad de que el análisis sea sistemático y que no surjan incongruencias en las

mediciones por usar otros métodos en el cálculo de cobertura de nieve y hielo. Este es un método robusto y fácil de aplicar y es menos sensible a las variaciones del albedo. El índice puede derivarse de la siguiente expresión:

$$\frac{(VIS - IR \text{ Medio})}{(VIS + IR \text{ medio})} \text{ ó lo que es igual para las bandas de SPOT-5:} \\ \frac{(\text{Banda 2} - \text{Banda 4})}{(\text{Banda 2} + \text{Banda 4})}$$

Este método toma ventaja de los altos valores de brillo de la nieve y el hielo en las longitudes de onda del rango visible (0.4–0.7 μm) versus el bajo brillo en los valores del infrarrojo cercano y medio (0.75–1.75

μm) (ver Fig.3). Esto permite discriminar de la imagen las capas de nieve de otros elementos como las rocas, el suelo ó la vegetación (Carrillo & Yépez, 2008).

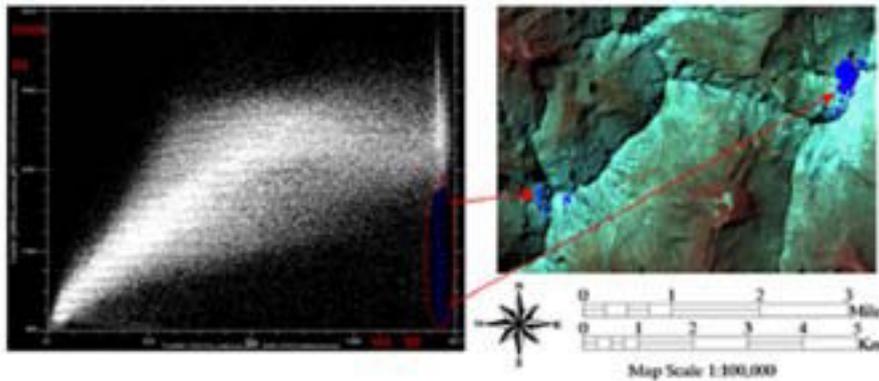


Figura 3: El hielo y la nieve presentan un aumento en el porcentaje de reflectancia en el espectro visible mientras disminuye en el espectro del infrarrojo medio

Hall (Hall et al., 1995) usa un umbral para los valores del NDSI en el cálculo de las coberturas de nieve. Si un píxel tiene un índice NDSI ≥ 0.40 y en la banda del

infrarrojo cercano (IRC) tiene una reflectancia > 0.11 , los píxeles serán clasificados como cobertura de hielo y nieve (ver Fig.4).

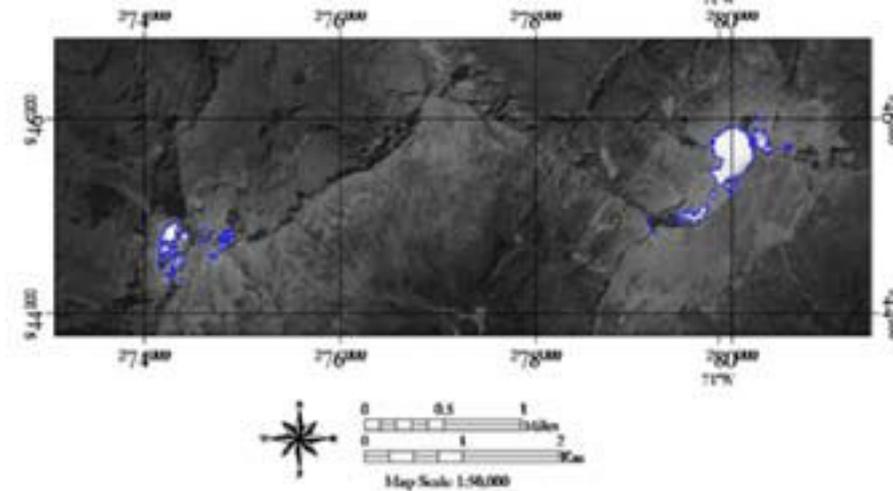


Figura 4: Resultado de NDSI: los colores en azul indican el umbral donde el índice es mayor o igual a 0.40 y la reflectancia en el infrarrojo cercano es mayor a 0.11

Una manera rápida de validar el análisis y medir el grado de mezcla de los materiales se realiza construyendo un perfil horizontal sobre el área de la imagen. Como se puede observar en la Figura 5, al alcanzar el contacto de la cobertura de nieve y hielo,

el valor del índice NDSI se dispara a valores por encima de 0.40, indicando que hay una buena diferenciación entre suelo, roca, sombra y la cobertura de hielo/nieve.

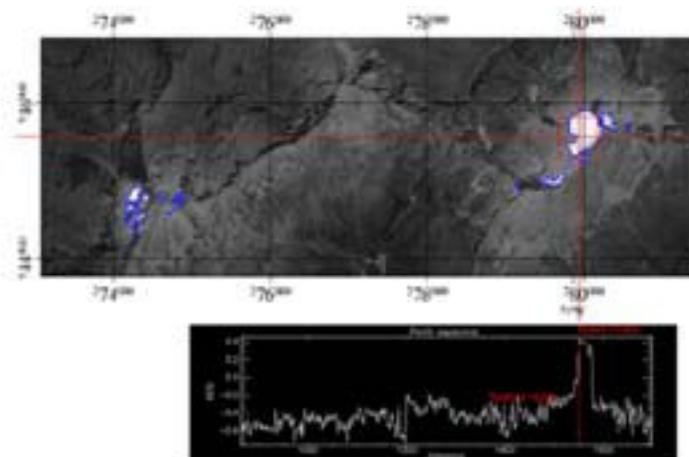


Figura 5: Los colores en azul indican los límites de la cobertura de nieve/hielo, y la línea roja horizontal la relación de la distancia con el índice NDSI, observe que al acercarnos al hielo y la nieve el índice se incrementa en valores superiores a 0.40

Sensor	Glaciar Sinigüis Km ²	Glaciar Espejo Km ²	Fecha	Autor
Fotografías Aéreas	2.03	0.18	1952	Schubert, C., 1952
SPOT-5	0.33	-	03-01-2008	Carrillo & Yépez, 2008
SPOT-5	0.24	0.071	11-01-2009	Yépez & Carrillo, 2009

Tabla 1. Evolución de la cobertura de nieve-hielo en los Glaciares Sinigüis y Espejo, Parque Nacional Sierra Nevada

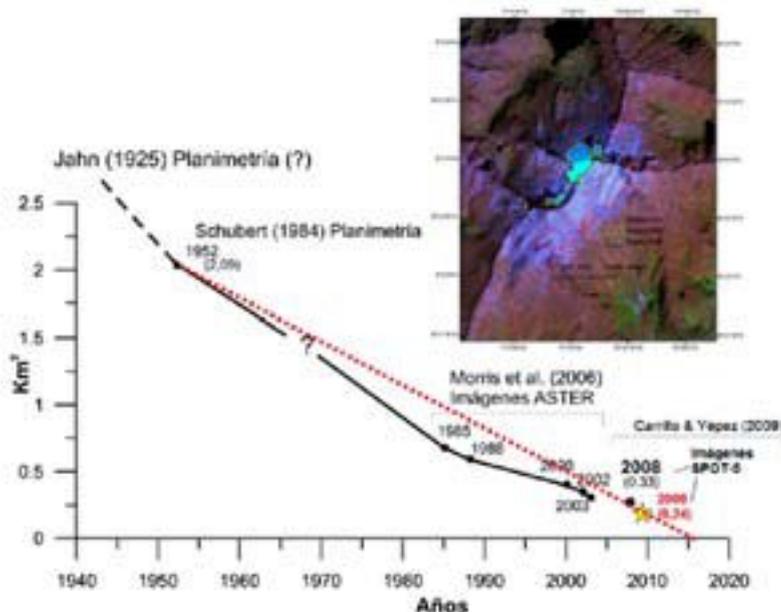


Figura 6: Evolución espacio-temporal de la cobertura de hielo-nieve para el glaciar Sinigüis

Los resultados cartográficos de diferentes autores desde principios de siglo XX y comienzos del XXI, para el glaciar Sinigüis, muestra una franca disminución en área (figura 6). Si se incluyen los datos de Morris et al., 2006, tomando en cuenta que actualmente el glaciar Sinigüis es el más grande de la región y asumiendo una regresión lineal en el tiempo, la desaparición de los glaciares en la Sierra Nevada de Mérida ya debería haber ocurrido (Carrillo & Yépez, 2008). Estas desacertadas proyecciones podrían estar afectadas en muchos casos por la baja resolución espacial de las imágenes ASTER utilizadas en el 2006 y al comportamiento no lineal en el retroceso de la masa glaciar.

Lo más adecuado sería continuar el monitoreo anual de los glaciares usando datos satelitales de mayor resolución espacial como el satélite SPOT-5 y relacionar este tipo de resultado con estudios de

balance de masa, evaluando así la dinámica sobre las coberturas y, estableciendo en una dimensión de tiempo mayor, si el acelerado retroceso está realmente asociado a un proceso de cambio climático. Observando la figura 7 sobre la evolución de los glaciares de los picos Bolívar y La Concha lo más impactante es la desaparición total de los glaciares Timoncitos y El Encierro (Bourgoin y Karsten), al igual que los glaciares Ño León y Coromoto en el pico La Concha, de estas concentraciones glaciares, sólo el Glaciar Espejo sobre el pico Bolívar sobrevive como remanente de la cobertura glaciar, aunque otros estudios previos a este, lo catalogan ya como desaparecido, nuestra investigación nos indica una extensión de 0.071 km², con una pérdida promedio de 1,91 m²/año desde el año 1952.

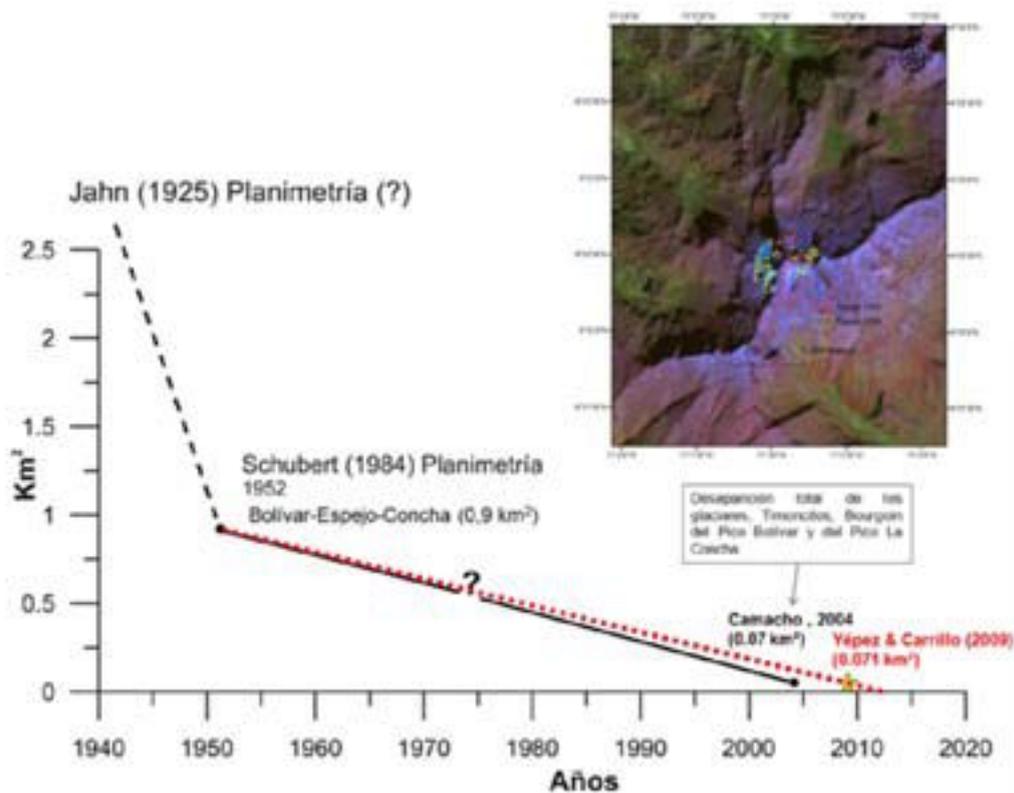


Figura 7: Evolución espacio-temporal de la cobertura de hielo-nieve para el glaciar Espejo-Bolívar y La Concha

En la figura 8 se puede observar el área afectada por la Glaciación Mérida, la cual fue la designación que se le dio a la glaciación alpina que afectó a los andes venezolanos central, durante el Pleistoceno Tardío. Dos niveles de morrenas principales han sido reconocidas: uno entre los 2600 y 2700 m (línea en magenta a los 2600 msnm), y otra entre los 3000 y 3500 m (línea blanca a los 3000 msnm) de altitud. El área de glaciares en la Cordillera de Mérida fue de aproximadamente 600 km², y aproximadamente 200 km² de la zona de glaciares total fue en la Sierra Nevada de Mérida, y de esa cantidad, la concentración más grande, 50 km², se encontraba en las zonas del Pico Bolívar, Pico Humboldt a 4.942 m y el Pico Bompland a 4.893 m (Schubert, 1980). Este límite superior a los 3000 msnm, probablemente

representó el último avance glaciar a finales del Wisconsin y se caracteriza por cerros altos (100 a 150 m sobre el fondo del valle) y semicirculares; su simetría refleja el movimiento valle abajo de los glaciares, el límite inferior que se encuentra a los 2.600 msnm, está caracterizado por sedimentos muy erosionados y vegetación espesa. Ambos niveles morrénicos pueden interpretarse como dos estadios dentro de la Glaciación Mérida, siendo el inferior el Temprano y el superior el Tardío. Actualmente, los glaciares de los picos Bolívar, Humboldt y Bompland, son sólo remanentes de toda una zona nevada que se erguía hasta la Sierra de Santo Domingo, sin embargo, si este acelerado retroceso continúa, los circos glaciares podrían desaparecer completamente en los próximos 10 años.

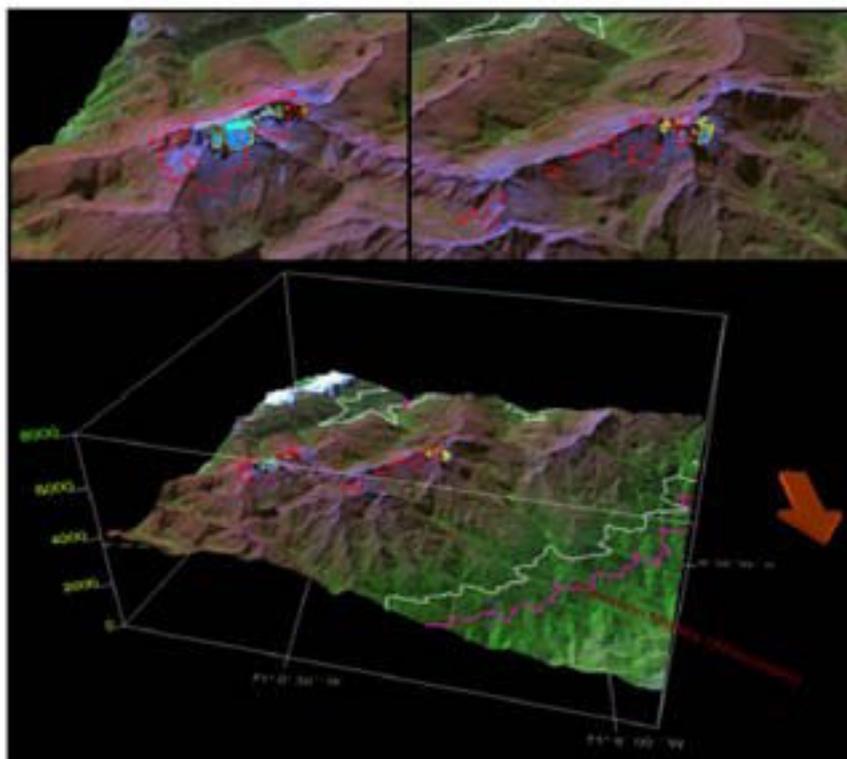


Figura 8: Comparación multi-temporal de los glaciares de Sierra Nevada en una visualización en 3D, la línea magenta coincide con el límite inferior de la glaciación Mérida ubicada a los 2600 msnm y la línea blanca coincide con el límite superior a los 3000 msnm. Note las marcas rojas en las figuras superiores al modelo 3D, ellas marcan la extensión de las coberturas glaciares para el año 1952, mientras la marca negra representa el año 2008 y la marca amarilla el 2009

CONCLUSIONES

De los 10 glaciares cartografiados en 1952 con un área total aproximada de 2.91 Km² (Schubert, 1998), solamente quedan 2 glaciares que pueden ser vistos a través de las imágenes satelitales SPOT-5. El más grande por su extensión el glaciar Sinigüis con una cobertura actual de 0.24 km², y una superficie de 31.4 m²/año perdidos desde 1952, luego está el glaciar Espejo sobre el pico Bolívar con una extensión de 0.071 km², y una pérdida de 1.91 m²/año desde el año 1952.

Este estudio ejemplifica el potencial de los métodos de visualización espacial para monitorear las coberturas glaciares. Sin embargo, el trabajo aún está en progreso, si bien es un método de visualización dinámica bastante efectivo, aún se puede mejorar significativamente la comprensión y el seguimiento a los movimientos de la masa glaciar. Esto ayudaría a entender mejor los procesos de cambio climático, así como los peligros resultantes en tales eventos.

Con la continuación de esta investigación se pretende

actualizar el monitoreo de los glaciares de Sierra Nevada desde los trabajos de Schubert en 1952, pero estudios glaciológicos como balance de masa y de energía, así como el comportamiento ante la variabilidad climática, aún se desconoce, por lo que los futuros objetivos de esta investigación estarán enfocados en estudiar a fondo estos aspectos, ya que con la desaparición de los glaciares de la Cordillera Mérida se marcaría el inicio de la extinción acelerada del resto de los glaciares tropicales de la región.

AGRADECIMIENTOS

A La Fundación Instituto de Ingeniería a través del laboratorio LPAIS (Laboratorio de Procesamiento y Adquisición de Imágenes Satelitales) del Centro de Procesamiento Digital de Imágenes, provee gentilmente las imágenes SPOT-5 utilizadas en este trabajo. Los autores igualmente agradecen a los colegas miembros del Grupo de Nieves y Hielos de América Latina del PHI-UNESCO, cuyas observaciones enriquecieron el contenido de este manuscrito.

BIBLIOGRAFÍA

- Bermúdez-Cella, M.; P. Van der Beek and Bernet, M., 2008. Fission-track thermochronological evidence for km-scale vertical offsets across the Boconó strike slip fault, central Venezuelan Andes. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, EGU2008-A-07173.
- Carrillo, E. & Yépez, S. 2008. Evolution of glaciers in the Venezuelan Andes: glaciers of the peaks Humboldt and Bompland. VII International meeting of researchers working with snow and ice from Latin America IHP - UNESCO. Magazine INGEOMINAS - Glaciares, nieves y hielos de América Latina Cambio climático y amenazas. Manizales, Colombia.
- Carrillo, E., Yépez, S., Carcaillet, P., Beck, C., Bernet, M., Bermúdez, M., Audemard F., 2010. The Cryosphere at Mérida Andes: a small ice-cap, a big challenge for science. *Internacional Glaciological Conference VICC 2010 Ice and Climate Change: a view from the south Valdivia, Chile, 1-3 February 2010.*
- Goering, A., 1962. Venezuela, el más bello país tropical. Ed. Universidad de los Andes, Mérida.
- Hall, D. K., Riggs, G. A., and Salomonso, V. V., 1995. Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. *Remote Sensing Environment*, 54, 127-140.
- Jahn, A., 1912. La cordillera venezolana de los Andes.: *Revista Técnica del Ministerio de Obras Públicas*, v. 2, no. 21, p. 451-488.
- Jahn, A., 1925. Observaciones glaciológicas en los Andes Venezolanos: *Cultura Venezolana*, v. 64, p. 265-280.
- Jahn, A., 1931. Los páramos venezolanos: *Boletín de la Sociedad Venezolana de Ciencias Naturales*, v. 1, no. 3, p. 93-132.
- Morris, J. N.; Poole, A. J. y Klein, A. G. 2006. Retreat of Tropical Glaciers in Colombia and Venezuela from 1984 to 2004 as Measured from ASTER and Landsat Images. In: *Proceedings of the 63rd Eastern Snow Conference*. Newark, Delaware: 180-191.
- Rod, E., 1956. Strike-slip faults of northern Venezuela: *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 40: 457-476.
- Schubert, C. y Vivas, L., 1993. El Cuaternario de la Cordillera de Merida; Andes Venezolanos. Universidad de Los Andes/Fundacion Polar, Mérida, Venezuela, 345 pp.
- Schubert, C., 1972. Geomorphology and glacier retreat in the Pico Bolívar area, Sierra Nevada de Mérida, Venezuela: *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, v. 8, no. 1-2, p. 189-202.
- Schubert, C., 1974. Late Pleistocene Merida Glaciation, Venezuelan Andes. *Boreas*, 3: 147-151.
- Schubert, C., 1979. La zona del páramo: morfología glacial y periglacial de los Andes de Venezuela: en Salgado –Laborouriau, M. L., (Ed) *El medio ambiente páramo*: Ediciones del Centro de Estudios Avanzados IVIC, Caracas, 11-23.
- Schubert, C., 1980. Contribución al inventario mundial de glaciares: *Boletín de la Sociedad Venezolana de Ciencias Naturales*, 34 (137): 267-279.
- Schubert, C., 1984. Basin formation along the Boconó-Morón-El Pilar fault system, Venezuela: *Jour. of Geophys. Res.*, 89: 5711-5718.
- Schubert, C., 1992. The glaciers of the Sierra Nevada de Mérida (Venezuela): A photographic comparison of recent deglaciation. *Erkunde*. 46, 58-64
- Schubert C., 1998. Glaciers of Venezuela. In Williams RS Jr. and Ferrigno JG (eds). *Satellite Image Atlas of glaciers of the World – South America*. USGS Professional Paper 1386-I. United States Government Printing office: Washington, DC: 1–10.
- Sievers, W., 1885-1886, Über Schneeverhältnisse in der Cordillere Venezuelas [On snow conditions in the Venezuelan Cordillera]: *Jahresbericht der Geographischen Gesellschaft in München*, v. 10, p. 54-57.
- Yépez, S. & Torres, W. 2008. Multi-temporal analysis of SPOT images in the Glacier "Buenos Aires" Hope Bay, Antarctic Peninsula. VI Simposio latinoamericano sobre investigación antártica & VII Reunión Chilena de investigación Antártica (Valparaíso- Chile) y XIII Simposio Latinoamericano de percepción remota y sistemas de información espacial (Havana Cuba).
- Yépez, S. Torres, W. & Rebolledo, R. 2009. Multi-temporal analysis and estimation of glacier flow in the "Buenos Aires" Hope Bay - Antarctica Peninsula. *Magazine Interciencia*. (In process of arbitration). P:1-12.
- Yépez, S., Espinola, E. Torres, W. & Arismendi, J., 2008. Análisis Multi-temporal de imágenes SPOT en el glaciar "Buenos Aires" Bahía Esperanza - Península Antártica. *Primera Expedición Científica Venezolana al Continente Antártico. PLANETACION Informe técnico*. Pág.: 1-4.

Mapping brazilian geoglyphs through HRC-CBERS-2B images

Paulo Roberto Martini

Brazilian National Institute on Space Research-INPE Remote Sensing Division - DSR
Astronautas Ave. #1758 Sao Jose dos Campos SP ZIP 12227-010
Phone: +55 12 3028 6470 - Fax: +55 12 3028 6488 martini@dsr.inpe.br

ABSTRACT

Ancient earthworks known as geoglyphs have been depicted by air photos over the landscapes of the State of Acre in Brazilian Western Amazonia. These features are believed to be of pre-Columbus age and so far no acceptable explanations were found to the purposes they were built. Geoglyphs are square or circular perfect designs and measures not much than three hundred meters and so have been also registered in high resolution frames collected by commercial satellites such those in GoogleEarth. This article describes how far HRC-CBERS public images can help one to recognize and to map the geoglyphs. Results show that HRC images are able to map and measure those features proving in this case that they can be reliable alternatives to commercial high resolution satellite images and even aerial photos.

RESUMEN

Antiguos movimientos de tierra conocidos como "geoglyphs", han sido mostrados por fotos aéreas sobre el paisaje en el estado Acre, al occidente de la Amazonia Brasileña. Estas características se cree que sean de la era Pre-Colombina y hasta ahora no existe una explicación convincente sobre su construcción. Los "geoglyphs" poseen diseños circulares o cuadrados perfectos con tamaños que no pasan los 300 metros en media, siendo posible su observación en imágenes de alta resolución colectadas por satélites comerciales, como es mostrado en la aplicación GoogleEarth. En este artículo se describe hasta qué punto las imágenes publicas del CBERS HRC pueden ayudar a reconocer la asignatura de los "geoglyphs". Los resultados muestran que las imágenes de HRC son capaces de mapear y medir estas características, mostrando en este caso que pueden ser alternativas viables cuando comparadas con imágenes comerciales de satélite de alta resolución o inclusive fotos aéreas.

SUMMARY

Several researchers have been studying through

years those features known as geoglyphs in the Western Amazon region mainly in the State of Acre. The features were built by pre-Columbus people and combine earth-wallet works with accurate designs such circles, squares and more complexes doubled ones. The geoglyphs have been observed in aerial-photos and lately this procedure were augmented by the use of low altitude oblique photos according Ranzi and Aguiar (2004). This article evaluates how much the HRC (2.5m- High Resolution CCD) images of the China-Brazil Earth Resources Satellite can help one to map those features since they were not depicted by TM sensor due to coarser resolution of these sensor when compared to HRC pixels.

Even though the starting point was to review the capacity of ETM+ scenes of LANDSAT-7 and more recently the CCD-CBERS-2B frames to map the features. Again here images of these devices were not able to register the geoglyphs. . Explanation for that is obvious: the ground resolutions of those sensors running between 20 to 15 meters were not capable to capture the features which dimensions run below 300 meters. Costly alternative under these conditions were to use higher resolution images and so it was tried the images of HRC-CBERS-2B with 2.5 meters pixel available free-of costs by INPE's Data Center. Selected HRC frames and the results obtained through this new approach to map geoglyphs in Brazil are described in the items that follow.

THE HRC- CBERS- 2B FRAMES

HRC is one out of tree sensing devices operating aboard China-Brazil Earth Resources Satellite number 2B, the third satellite of the family. The sensor collects panchromatic radiation supplied by green plus red brightness of natural targets separated by 2.5 meters pixel, a distance generally adopted as high resolution by experts. Radiometry is registered in 8 bits of quantization allowing 512 levels of gray as recorded from the conventional orbital devices in Brazil.

Each HRC scene covers a terrain grid of 25 by 25 kilometers and so to cover a whole CCD scene of 130

by 130 kilometers the satellite needs to record 25 frames in 25 nominal passages. Knowing that revisit timeframe of CBERS is 26 days then the temporal resolution for HRC is 5 times that period or, 150 days, eventually twice a year. To nominate each HRC frame is used paths and rows of the CCD grid with additional 5 letters from "A" to "E" for interval rows and 5 numbers from "1" to "5" for interval paths. So Revisiting is not a special attribute of HRC. This fact points that cloud free HRC images over the study area (lying in a tropical region) are not easy available

To undertake this work the author used three HRC digital frames recorded in July 13th 2008. They are numbered as:

- WRS 179C_111_1 with 531 megabytes
- WRS 179C-111_3 with 177 megabytes
- WRS 179C-111_4 with 177 megabytes.

The images were analyzed by means of IMAEDIT a tool that is available as a freeware by INPE at www.dgi.inpe.br. The digital procedures were very simple as all scenes were contrast-stretched using conventional histograms. To the frames were not applied any kind of geometric corrections.

RESULTS

Twelve geoglyphs were studied so far. Analysis begins with the visualization of the features in the bibliography, mainly in Ranzi and Aguiar (op. cit.), followed by their recognition in the HRC pictures. These first observations included vertical aerial photos as well. Example of such view is featured in figure 1 collected by twin-engine airplane of INPE when pursuing photogrammetric data in the State of Acre. The structures registered by the aerial photos measure 100 meters (circle) and 300 meters (square).

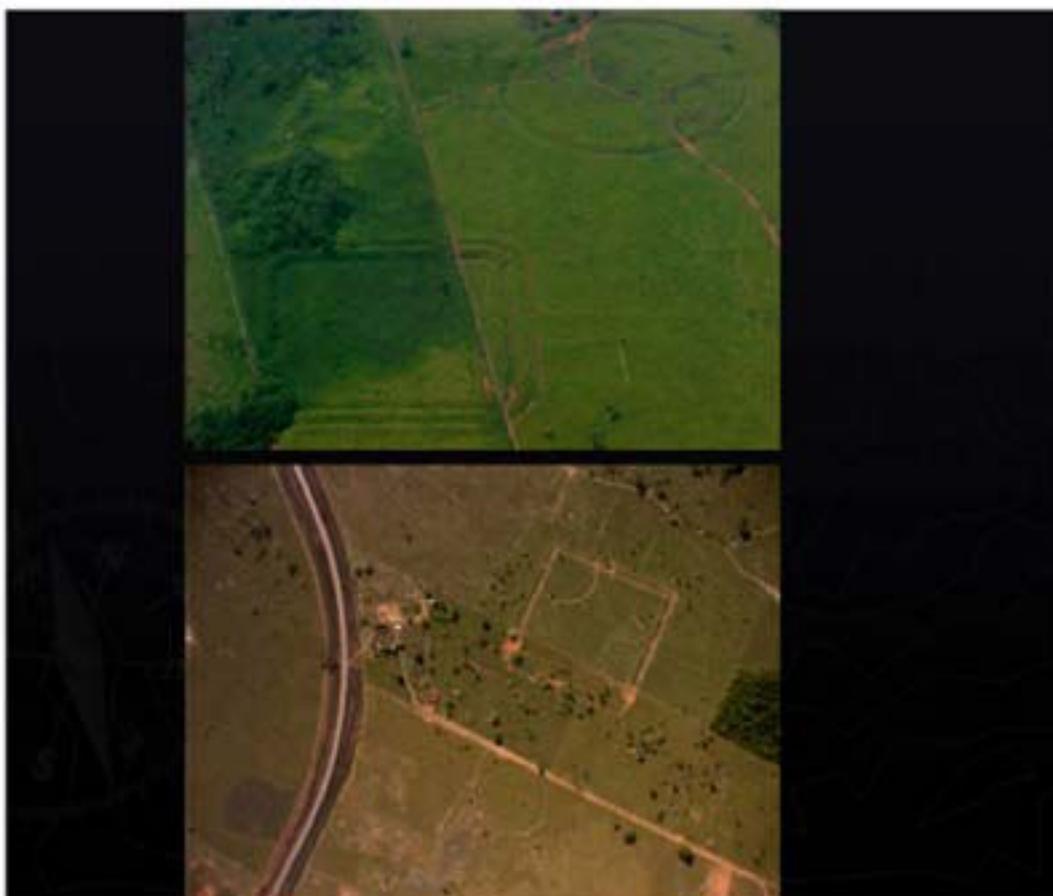


Figure 1: Aerial vertical photos collected by INPE's airplane showing some geoglyphs. It might be noted the perfect geometry of the ditching structures or earthworks. The highway in the lower picture is the Road BR-317 and the features are located in Colorada Farm according to the available bibliography. (Picture by Carlos Alberto Steffen)

The earthworks shown in the lower photo of figure 1 were also identified in HRC frame according to figure 2. This figure shows the BR-317 in hits true position since the image is oriented to the North (upper part of

the scene). The circular geoglyph and the one looking like a golf field, they are depicted at the center of the scene just by South of BR-317.



Figure 2: HRC image showing the features of the lower aerial photo of Figure 1. The golf field feature lies at the center of the image

Some geoglyphs that were studied in the HRC frames are listed in the technical literature but others are showing very complex designs that are not described elsewhere. The structure of Figure 3 for instance is not described in the available scientific literature about geoglyphs. The structure of Figure 4 was mapped from a Google-high-resolution frame and shows a design very complex. Again in this case the geoglyph is not mentioned in the available literature studied in this article (Ranzi and Aguiar, op.cit.; Schaan and others, 2009). A very keen observation over the Figure 4 depicts ditched corridors that connect two geoglyphs of high complexity. These complex structures were mapped in a Northern region close to the city of Boca do Acre in the State of Amazonas. The distribution of the forest covering the features demands care analysis because it can lead to new and deep scientific questions. The example of Figure 5 shows that the leftside of the geoglyph is covered by tropical forest. This situation can support the idea that the feature is older than the forest. It is not that difficult to recognize that the amazing designs were easily to

ditch under a savanna coverage and not under a heavy tropical forest. Otherwise and so far the features only appear after deforestation. It must be stressed that urban Amazon sites known as garden cities are been described in the high valley of Xingu River by Heckenberger and others (2003). These garden cities can be associated to a savanna environment due their urban design but the current coverage is the heavy tropical forest. Anyway, some sites with geoglyphs were checked in the field by a scientific team including the author as can be seen in Figure 6. The figure shows the ground design of a classical geoglyph mapped in the farm of Mr. Jacob Sah in the vicinity of the Road 317 few kilometers to the North of Rio Branco. The left part of the figure displays the ground signature of a squared structure with Dr. Alceu Ranzi (left) and Mr. Janary de Moraes, an Amazonian explorer that died climbing the mountains around Cuzco in Peru. The right part of the figure shows how deep the ditches are compared to the height of the scientists (Professor Ranzi and the author).

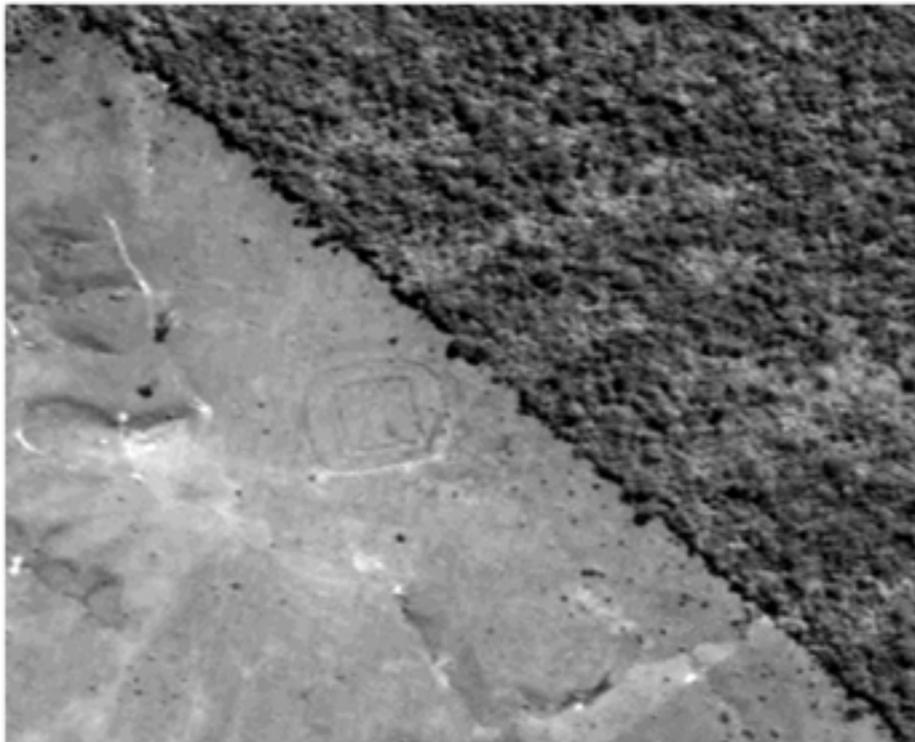


Figure 3: Geoglyph showing perfect geometry. It is not described in the available literature but it said to be known by recent studies (Dr. Alceu Ranzi, oral information)

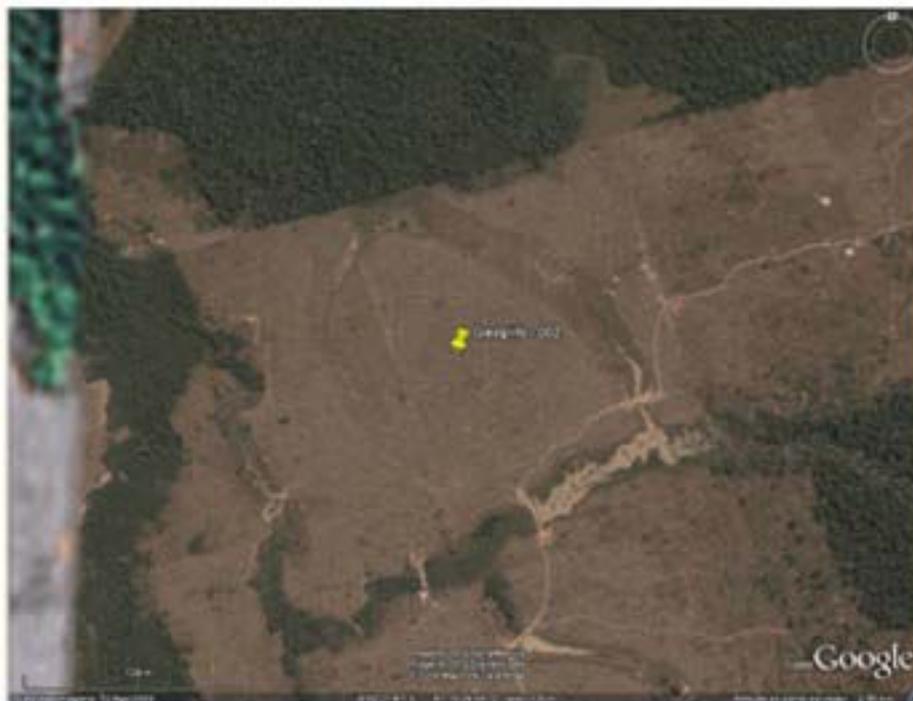


Figure 4: Very complex feature showing unconventional and sophisticated design.. (Source: Edvard Zanic-INPE/DGI & GOOGLE)

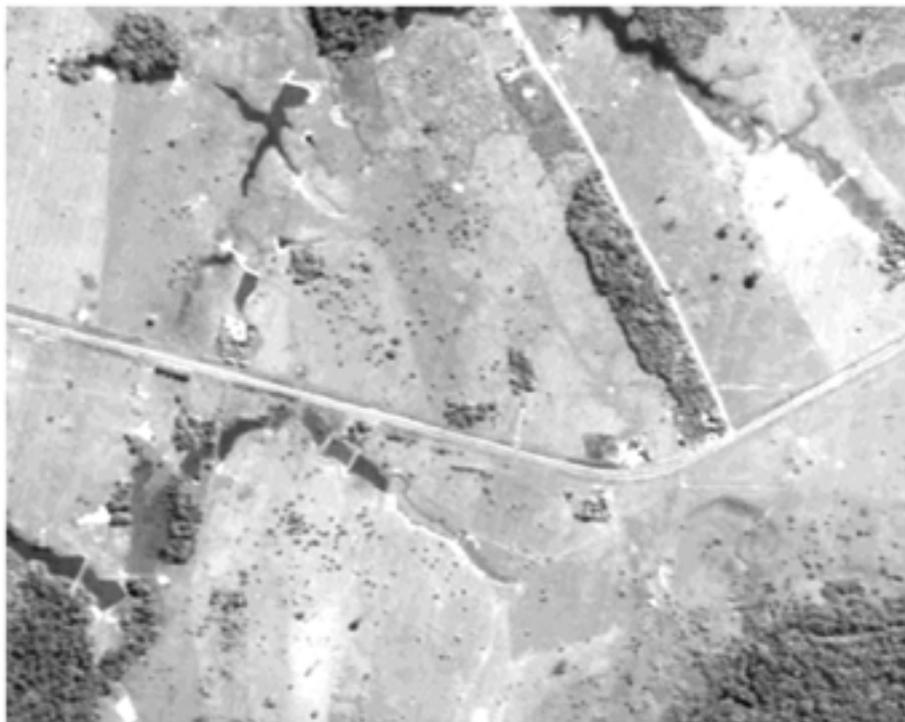


Figure 5: Image HRC with a feature crossed by the Road 317 at right margin of the scene. The upper left corner of this geoglyph is covered by heavy forest leading to speculate about the age of the forest coverage



Figure 6: Ground observations of geoglyphs. The square and the circle earthworks are just behind the investigators at left. The right picture demonstrates how deep they are

ANALYSIS OF RESULTS

Results demonstrate that HRC images have appropriate attributes to survey Brazilian geoglyphs in terms of ground resolution and radiometric sensing as well. It must be mentioned that images were collected in the dry season when the contrast between the ditches and the surrounding green coverage is lower. So contrasts were registered by the images even though the lower seasonal brightness.

Another important point is that the dimensions of the features measured over the images matched truly well with those that were done in the field. The positioning of the geoglyphs otherwise was not evaluated in this work but it was noted that nominal HRC lat/long coordinates without corrections are not as accurate as GOOGLE. So HRC images demand positioning-advanced geometric corrections that were not attended in this work.

A last but important point is the study area (25 km wide and 50 km long) by was just a small part of the whole distribution country of geoglyphs in Brazil which includes the states of Acre and Rondonia and can advance to Bolívia comprising more than 500 square kilometers.

CONCLUSIONS

Results indicate that HRC images hold the same geometric attributes of the 50-centimeter-resolution air photos usually applied to map those features and are reliable and cost-effective alternatives to commercial high resolution satellite images.

Results also recommend the application of HRC data to archaeological studies in other sites of known geoglyphs in South America such as the high valley of Xingu River in Brazil, the Beni River lowlands in Bolívia and the Nazca Plateau in Peru.

BIBLIOGRAPHY

- Heckenberger, M.L.; Kuikuro, A.; Kuikuro, U.T; Russel, C.; Schmidt, M.; Fausto, C.; Franchetto, B., 2003. Amazonia 1492: Pristine Forest or Cultural Parkland. *Science* vol.301, 5640, 1710-1714.
- Ranzi, A.; Aguiar, R., 2004. *Geoglifos da Amazônia - Perspectiva Aérea*. Editora da Faculdade Energia, Rio Branco-AC, 53 páginas.
- Schaan, D.; Ranzi, A.; Parssinen, M.(org.), 2008. *Arqueologia da Amazônia Ocidental: os Geoglifos do Acre*. Prelo, 147 páginas.

Evaluación de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM y su relación con los errores planimétricos de datos pancromáticos Quickbird ortorrectificados

Gastón M. Díaz (1); Mariano Gomez (1); Florencia Deccechis (2); José D. Lencinas (1); Héctor Francisco del Valle (3)

(1) Laboratorio de Percepción Remota y SIG. Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico (CIEFAP). Ruta 259 km 4. 9200 Esquel, Chubut, Argentina. Tel: 02945-453948 int. 216. gdiaz@ciefap.org.ar

(2) Dirección General de Bosque y Parques, Provincia del Chubut, Argentina

(3) Ecología Terrestre, Centro Nacional Patagónico (CENPAT-CONICET), Chubut, Argentina

RESUMEN

En datos satelitales de áreas montañosas con geometría de observación fuera del nadir, la exactitud planimétrica de las orto-imágenes depende fundamentalmente de la calidad geométrica de los modelos digitales de elevación (MDE) utilizados. Dado los altos costos de generar un MDE, el primer objetivo de este trabajo fue estudiar la influencia de este factor en las ortorrectificaciones. Por otro lado, en áreas montañosas rurales, el muestreo de puntos de control es condicionado por varios factores, impidiendo la aplicación de diseños de muestreo netamente aleatorios o sistemáticos. En relación a ello, el segundo objetivo fue evaluar la efectividad de los diseños típicos de estimación de la exactitud planimétrica de orto-imágenes. Se utilizaron datos pancromáticos QuickBird de un área montañosa escarpada y los MDE SRTM-C/X y ASTER GDEM. Se determinó el error en los mencionados MDE y se ortorrectificaron los datos con un modelo físico, estimando su exactitud planimétrica mediante puntos de control independientes. Se realizó una comparación sistemática entre orto-imágenes. Los errores y divergencias entre ortorrectificaciones se analizaron mediante gráficos, estadísticos descriptivos (media, desvío estándar y RMS) y pruebas de inferencia (prueba de t y ANOVA). El RMS del SRTM-X fue el más bajo, sin embargo, no se observaron diferencias estadísticamente significativas en la exactitud de las orto-imágenes, mientras que en la comparación entre orto-imágenes se observaron áreas con pronunciadas divergencias. Considerando que el error en los MDE está estrechamente relacionado con la pendiente, se concluyó que la distribución espacial de los errores planimétricos ocasionó la falta de representatividad en la estimación de exactitud realizada.

Palabras clave: diseño de muestreo, errores verticales, exactitud planimétrica, puntos de control en el terreno.

ABSTRACT

The planimetric accuracy of orthoimages produced

from off-nadir viewing satellite data acquired over strongly alpine terrain, depends mainly on the geometric quality of digital elevation models (DEM) used for processing. Due to higher costs of DEM construction, our first goal was to study the impact of DEM on the orthorectification process. On the other hand, ground control points sampling in rural mountainous areas are conditioned by several factors, so it is not possible to apply there random or systematic sampling designs. In this regard, our second goal was to evaluate the effectiveness of sampling designs typically used for planimetric accuracy assessment of orthoimages. QuickBird panchromatic data of a rugged mountainous area were used as well as the SRTM-C, SRTM-X and ASTER GDEM models. The errors in the above mentioned DEMs were estimated; QuickBird data were orthorectified with a physical model, and their horizontal accuracy was estimated with independent ground control points. In addition, the orthoimages were compared systematically amongst them. The errors and divergence between orthoimages were analyzed with graphics, descriptive statistics (mean, standard deviation and RMS) as well as inference tests (t-test and ANOVA). SRTM-X RMS was the lowest, however, there were no statistically significant differences in the planimetric accuracy of the orthoimages, whereas the comparison between orthoimages showed regions with high divergence. Considering that the DEM errors are closely related to the slope, it was concluded that the spatial distribution of planimetric errors caused the lack of representativeness in the estimation of accuracy made.

Key words: sampling designs, vertical errors, horizontal accuracy, ground control point.

INTRODUCCIÓN

En teledetección de áreas montañosas, el relieve provoca distorsiones de magnitud variable en función de la geometría de observación del sensor y del grado de rugosidad del terreno. En dicho caso, la corrección geométrica de datos satelitales debe realizarse con integración de modelos digitales de elevación (MDE),

de acuerdo con Itten et al. (1992), Toutin (1995) y Rochini y Di Rita (2005). Este tipo de corrección se realiza mediante un modelo de ortorrectificación (MO). La ortorrectificación es un proceso que se realiza rutinariamente en teledetección, pero la calidad de los resultados varía en función del método utilizada. En dicho proceso, la exactitud planimétrica es función de la calidad de la imagen, los puntos de control en el terreno (GCP, siglas en inglés), el MO y el MDE (Jensen 2000). Con respecto al factor imagen, la nitidez para identificar elementos puntuales es clave (Toutin y Chénier 2004). En relación a los GCP, Rocchini y Di Rita (2005), y Aguilar et al. (2007) demuestran que aproximadamente 10 GCP bien distribuidos y exactos son óptimos, no obteniéndose un incremento substancial en la exactitud al aumentar el número de GCP. El MO de Toutin (Toutin et al. 2002), es del tipo paramétrico riguroso y ha demostrado ser el más apto para la generación de orto-imágenes (Kay et al. 2003, Toutin 2004, Sánchez y Pérez 2005, Aguilar et al. 2008). Con respecto al MDE, en zonas montañosas y cuando las imágenes son tomadas con ángulos de inclinación mayores a 15°, el error en el MDE es determinante de la exactitud planimétrica de una orto-imagen (Aguilar et al. 2007, Kapnias et al. 2008).

La exactitud planimétrica se evalúa a través del Error Medio Cuadrático (RMS, Root Mean Square) expresado en metros. El RMS debe calcularse a partir de los residuos observados en puntos de control independientes (ICP, siglas en inglés), no utilizados para ajustar el MO. El error puede ser representado gráficamente como un vector entre las coordenadas geográficas del centro del objeto utilizado como ICP (usualmente medidas en el terreno con equipos GPS) y la representación del mismo punto en la orto-imagen (Rico et al. 2006). Para generar la orto-imagen, primero se debe ajustar el MO con los GCP y luego ejecutar la ortorrectificación con un MDE (Toutin 1995). Diferenciar estos pasos en el reporte del RMS permite interpretar la propagación del error del MDE a la orto-imagen (Aguilar et al. 2007).

Para procesar datos satelitales, se debe fijar una escala objetivo en relación al destino de la orto-imagen (Rico et al. 2006, Lencinas y Siebert 2009). El MDE utilizado en la ortorrectificación debe describir los objetos de la escena con un grado de exactitud acorde a la escala objetivo. Para generar orto-imágenes de muy alta resolución espacial (< 3 m), la Comisión Europea recomienda utilizar MDE con un error vertical de RMS entre 5 y 2 metros, en función del ángulo de adquisición (Kapnias et al. 2008). Desafortunadamente, MDE con el nivel de detalle requerido todavía no están disponibles para gran parte de la Tierra, o carecen de suficiente exactitud (Toutin 2008). Generar un MDE tiene altos costos, por lo tanto, conocer en profundidad la influencia del MDE en la exactitud planimétrica de orto-imágenes, es

necesario para evaluar la factibilidad de alcanzar una escala objetivo.

Por otro lado, en áreas montañosas rurales, el muestreo de los ICP para estimar exactitud planimétrica es condicionado por varios factores. Los más importantes son: costosa accesibilidad a zonas de alta montaña; baja frecuencia espacial de objetos identificables con precisión (condicionando la identificación de elementos puntuales); e interferencia de la señal del GPS por parte del dosel forestal y las montañas. Estos factores dificultan la aplicación de algunos diseños de muestreo tales como el aleatorio simple o el sistemático, con una cantidad representativa de ICP. Estas dificultades se resuelven operativamente con un diseño de muestreo dirigido, asegurando la distribución uniforme en el plano y rango de elevaciones, pero considerando los factores antes mencionados, es decir, accesibilidad, presencia de elementos puntuales e interferencia de la señal del GPS (Kay et al. 2003, Toutin 2004, Aguilar et al. 2007, Gonçalves et al. 2009).

Los objetivos del presente trabajo fueron, 1) estudiar la influencia del factor MDE en las ortorrectificaciones y 2) evaluar la efectividad de los diseños típicos de estimación de la exactitud planimétrica de orto-imágenes.

MATERIALES Y MÉTODOS

En términos generales, se procedió utilizando una imagen de alta resolución espacial para cuantificar la propagación del error vertical de los MDE a las orto-imágenes, en el proceso de ortorrectificación. Con este procedimiento, gracias a la alta resolución espacial de los datos a corregir, se asegura una estimación precisa de los errores planimétricos.

El Área de Estudio se localiza en la Región Andino Patagónica Argentina, caracterizada por cordones montañosos y sierras modeladas por procesos glaciares. Esta ubicada en el SO de la provincia de Río Negro (41° 57' S y 71° 31' O). Ocupa una superficie de 100 km², con altitud variable entre 240 y 2200 m snm. Existen dos ríos permanentes con sentido de escurrimiento N-S: al oeste el Río Azul y en el centro el Quemquemtreu. Las máximas elevaciones se encuentran en el sector este, en el Cerro Piltriquitrón, con una altura máxima de 2280 m snm (la cima no está incluida en el área de estudio). La mayor parte de la superficie está ocupada por bosques puros y mixtos del género *Nothofagus* y ciprés de la cordillera (*Austrocedrus chilensis* (D. Don) Pic. Serm. et Bizarri). En el valle del Quemquemtreu se emplaza El Bolsón, con aproximadamente 30.000 habitantes. El norte del valle está cubierto en gran parte por cultivos de frutas finas (figura 1).



Figura 1: Área de estudio

Se utilizaron datos pancromáticos ópticos del satélite QuickBird, producto "Panchromatic OrthoReady" (450 a 900 nm) con una resolución espacial nominal de 0,6 metros, capturados bajo programación el 03/10/2009, con azimut $84,4^\circ$ e inclinación del sensor de $8,7^\circ$. Los MDE utilizados fueron los SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) C y X, y ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) Global DEM (AGDEM). El SRTM-C tiene una resolución espacial de aproximadamente 90 metros; el SRTM-X y el AGDEM de 30 metros.

Los Puntos de control en el terreno (GPS e ICP) fueron medidos con los equipos Trimble GeoXT y 4600SL, usando corrección diferencial en fase (DGPS). Se muestrearon 9 GCP distribuidos según las recomendaciones de Toutin (2004). Se situó un GCP en el sector de mínimas y otro en el de máxima alturas, los 7 restantes se seleccionaron considerando una distribución uniforme en los bordes de la imagen. En base a un diseño de muestreo dirigido, se midieron 19 ICP.

Para estimar el error en los MDE, se calculó el error vertical con 29 puntos de control mensurados con DGPS (algunos de ellos fueron utilizados como GCP o ICP). El error fue calculado como la diferencia entre la altura observada (hobs) y estimada por el modelo

(hest), la ecuación utilizada fue $estobshhhError$.

Se calcularon los estadísticos RMS, media y desvío estándar (Reuter et al. 2009). Dado que la distribución teórica del error es normal con media igual a 0, se utilizó la prueba de Shapiro Wilk (SW-W) y la prueba de t para verificar estos supuestos (Greenwalt y

Shultz 1962, Steel y Torrie 1993 y Atkinson y Foody 2002)

Se realizaron 3 ortorrectificaciones (una por cada MDE) con el modelo físico de Toutin del programa Geomática PCI V10.1.3. Se utilizó la convolución cúbica como algoritmo de remuestreo. Todos los procedimientos fueron realizados en el sistema de coordenadas Gauss-Krüger faja 1 con datum y esferoide WGS 84. La comparación entre ortorrectificaciones con diferente MDE fue realizada mediante digitalización en pantalla (escala 1:100) de vectores de divergencia entre un punto identificado en la imagen de referencia y el mismo punto en la imagen a comparar, obteniéndose la divergencia en x e y (divx y divy) entre dos imágenes para un punto relativo en el espacio. Con este propósito, una malla con celdas de 750 m fue superpuesta al área de estudio, en el centro de cada celda se dibujó un círculo de 25 metros de radio. En cada uno de los círculos se trazó un vector de comparación en el punto más claramente comparable. Con esta metodología se digitalizaron 182 vectores. Con la longitud de los vectores de divergencia asignada como atributo a los círculos de 25 m de radio, se los convirtió de vector a superficie raster mediante red de triángulos irregulares (TIN, siglas en inglés). Se promediaron los tres raster para detectar las áreas sin cambios sustanciales de posición relativa (figura 3).

La estimación de exactitud planimétrica se basó en el reporte de ortorrectificación del programa Geomática PCI V10.1.3. Para que los residuos reportados representen el error en el producto final, a cada ICP se le asignó la altura del MDE que sería utilizado en la

ortorrectificación. Por convención, a los residuos reportados se los multiplicó por menos uno. Con los residuos x e y ($error_x$ y $error_y$) se calculó el RMS, Error Medio (EM), Desvío Estándar (S) e intervalo de confianza al 95% (IC), de acuerdo a Atkinson y Foody (2002), Rico et al. (2006) y Gonçalves et al. (2009). También se puso a prueba los supuestos de normalidad de los errores y "media igual a 0" (prueba de SH-W y de t). Para comparar varianzas se utilizó la prueba de F de igualdad de varianzas (Steel y Torrie 1993).

Se realizaron gráficos de tipo "caja y bigotes" con los errores y divergencias en x e y . Se consideró como valores aislados los alejados de la mediana 1,5 veces el rango intercuartil, y extremos a los alejados 3 veces. Se realizó un Análisis de la Varianza (ANOVA) con los errores en el ajuste del modelo y en las orto-imágenes, la variable de interés fue $error_x$ y $error_y$, siendo la

fuerza de variación el origen de la altura utilizada en los ICP (GPS, SRTM-C, AGDEM o SRTM-X).

RESULTADOS

Estimación del error en los MDE. Los errores en SRTM-X tuvieron menor dispersión que los del AGDEM y SRTM-C (figura 2). En el SRTM-C, la distribución tuvo tendencia hacia los valores negativos. Sólo en el caso del SRTM-X y AGDEM los errores se distribuyeron normalmente (cuadro 1). El RMS del SRTM-X fue notablemente inferior al del SRTM-C y AGDEM. En SRTM-X y AGDEM, la prueba de t demostró la falta de tendencia. Por otro lado, la prueba de F confirmó que el desvío estándar de los errores verticales en el AGDEM fue mayor que el registrado en el SRTM-X.

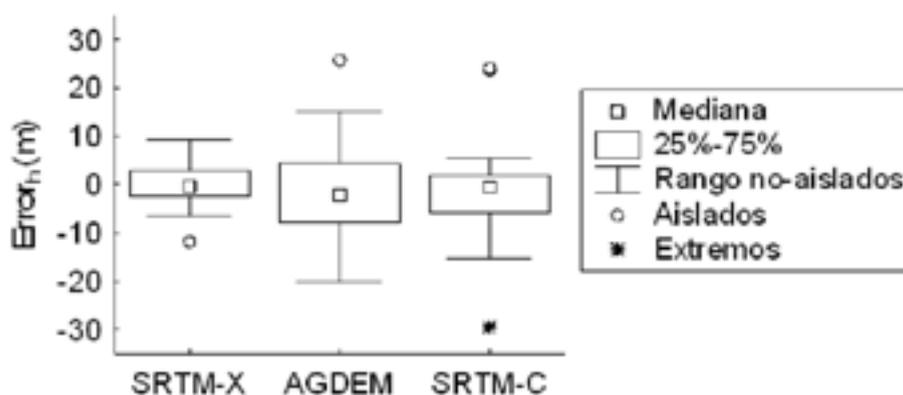


Figura 2. Distribución de los errores verticales ($error_h$) entre MDE

MDE	RMS (m)	Media (m)	S (m)	valor de p		
				SH-W	t	F
SRTM-X	4,3	-0,38	4,36	ns	ns	***
AGDEM	9,83	-1,31	10,1			
SRTM-C	10,02	-	-	**	-	-

Cuadro 1. Estadísticos del error vertical en MDE ($error_h$) calculado con 24 puntos de control (S = desvío estándar).

Exactitud planimétrica. Los errores estimados en el eje x fueron mayores a los del eje y (cuadro 2). La prueba de t demostró que existe tendencia o error sistemático en el eje x pero no en el eje y. El ANOVA indicó que no existen diferencias significativas en la

exactitud planimétrica de las orto-imágenes generadas con distinto MDE, tanto en x ($p=0,25857$) como en y ($p=0,99541$). El análisis visual de la figura 3 ratifica este resultado.

			RMS	EM	S	IC	valor de p	
			(m)	(m)	(m)	(m)	SH-W	t
Ajuste del modelo	Altura GPS	x	1,88	-1,42	1,18	$\pm 1,14$	ns	***
		y	1,00	-0,24	0,96	$\pm 0,93$	ns	ns
		lineal	2,12	-	-	-	-	-
Ortorrectificación con:	SRTM-X	x	1,67	-1,17	1,22	$\pm 1,18$	ns	***
		y	0,97	-0,21	0,97	$\pm 0,94$	ns	ns
		lineal	1,93	-	-	-	-	-
	AGDEM	x	1,28	-0,64	1,13	$\pm 1,09$	ns	*
		y	0,98	-0,16	1,00	$\pm 0,96$	ns	ns
		lineal	1,61	-	-	-	-	-
	SRTM-C	x	2,07	-1,34	1,62	$\pm 1,56$	ns	**
		y	1,01	-0,23	1,00	$\pm 0,97$	ns	ns
		lineal	2,30	-	-	-	-	-

Cuadro 2. Estimación de exactitud planimétrica. Error Medio (EM), Desvío Estándar (S), intervalo de confianza al 95% (IC), prueba de Shapiro Wilk (SH-W) y de t ($H_0: EM=0$), calculados con 19 ICP (* = $p < 0,05$; ** = $p < 0,01$; *** = $p < 0,001$; ns = no significativo)

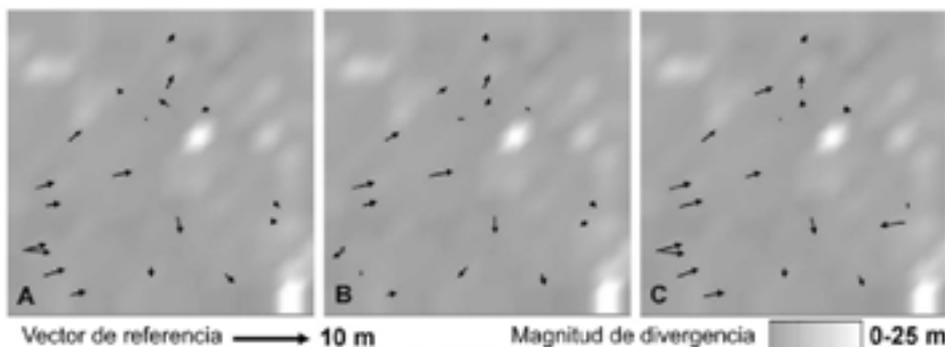


Figura 3. Vectores de error planimétrico del área de estudio incrementados 250 veces. En escala de grises, la divergencia promedio entre orto-imágenes generadas con distintos MDE. A) Ortorrectificación con SRTM-X, B) con AGDEM y C) con SRTM-C

Comparación entre orrorrectificaciones. La divergencia entre orrorrectificaciones fue notablemente mayor en el eje x en comparación con

el eje y (cuadro y figuras 3). Se observaron algunos valores extremos, que mostraron un marcado patrón de distribución espacial (figura 4).

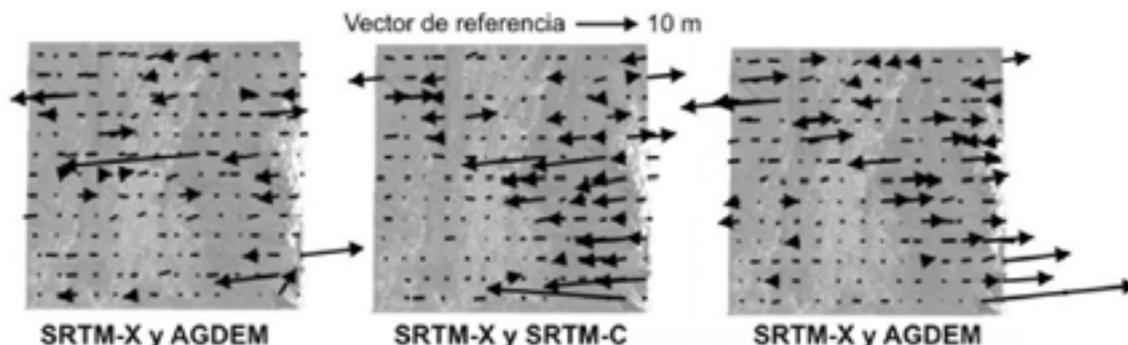


Figura 4. Divergencia entre ortorrectificaciones con distinto MDE. Vectores incrementados 250 veces sobre imagen QuickBird (10 x 10 km)

Divergencia entre		RMS (m)	mediana (m)	Rango intercuartil (m)	valor de p SH-W
O/SRTM-X y O/AGDEM	x	2,50	0,53	1,81	***
	y	0,42	0,00	0,09	
O/SRTM-X y O/SRTM-C	lineal	2,53	1,14	1,19	-
	x	2,97	0,17	1,88	***
O/SRTM-C y O/AGDEM	y	0,34	0,00	0,10	
	lineal	2,99	0,87	1,46	-
O/SRTM-C y O/AGDEM	x	3,08	0,05	2,28	***
	y	0,35	0,00	0,16	
O/SRTM-C y O/AGDEM	lineal	3,10	1,16	1,53	-

Cuadro 3. Divergencia entre ortorrectificaciones (n=19; ICP). SH-W hace referencia a la prueba de Shapiro Wilk (***) = p < 0,001).

El patrón de distribución espacial mencionado en el párrafo anterior, está asociado a las características de la topografía. En terrenos relativamente llanos, la divergencia es menor que en terreno escarpado. En la figura 5, este patrón puede verse como una pérdida de nitidez en la fila b, desde casi nula en la columna 1, a muy pronunciada en la columna 3. Existen algunos

vectores que no siguen este comportamiento. En la figura 4, el inicio del vector de divergencia más largo (aproximadamente 25 metros) en la comparación SRTM-X y AGDEM, indica la posición en la escena del artefacto encontrado en la imagen ortorrectificada con SRTM-X (figura 6). En ese sector el terreno es moderadamente rugoso.

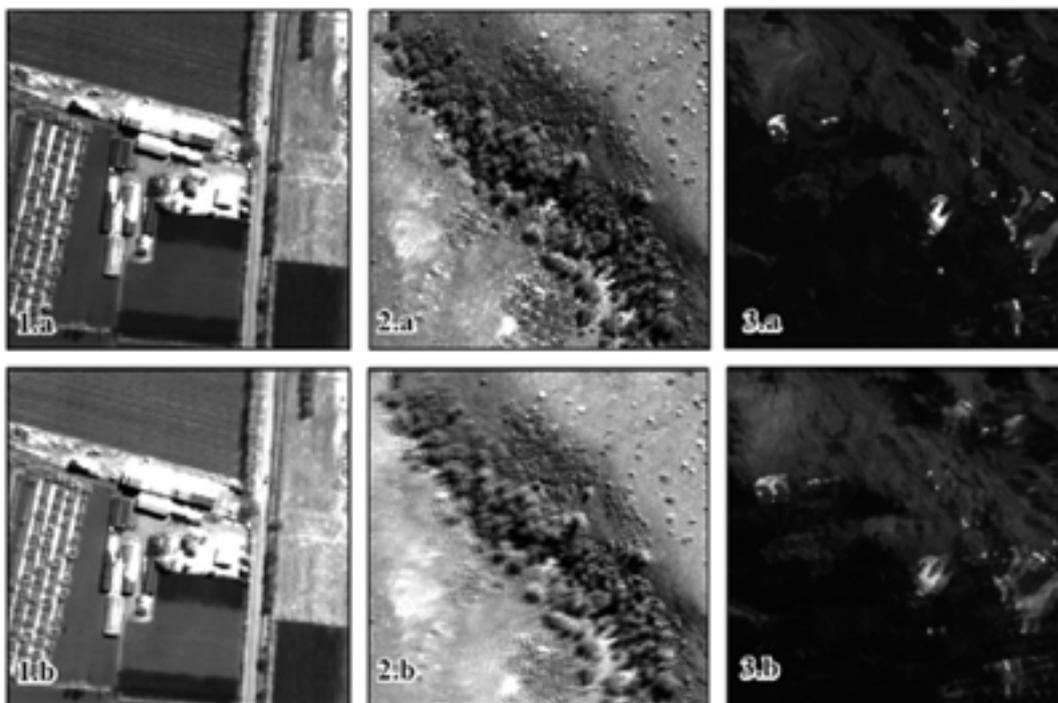


Figura 5. Recortes de imagen pancromática QuickBird de 250 x 250 metros. fila a, ortorrectificación con SRTM-X. Fila b, combinación en diferentes canales (RGB) de ortorrectificación con SRTM-X, C y AGDEM (en escala de grises). Columna 1, zona urbano-rural en el valle del Quemquemtreu; 2, bosque en la ladera del Co. Pilquitrón; y 3, zona de alta montaña del mismo Cerro

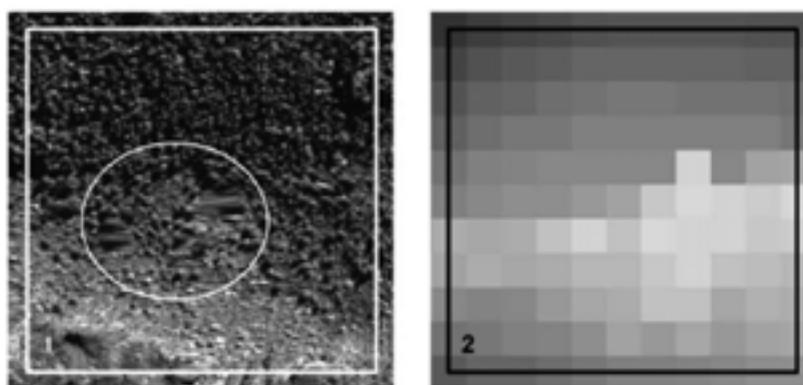


Figura 6. Artefactos producidos en datos pancromáticos QuickBird ortorrectificados con SRTM-X. Los recortes representan un área de 300 x 300 metros. 1) Ororrectificación con SRTM-X; 2) imagen de estimación de calidad anexa al SRTM-X, los colores claros indican presencia de errores en los datos de elevación

DISCUSIÓN

En relación al error vertical del SRTM-X, Ludwig y Schneider (2006) reportan un RMS de 22,96 m, media de 9,26 m y desvío estándar de 21,35 m; con 31 ICP. Para MDE derivados de escenas ASTER, Toutin (2002) reporta que los errores tienen un 90 % de probabilidad de ser menores a 51 m, con media de 11,7 m; comparado con cartografía a 1:50000 con equidistancia de 10 m. También para MDE ASTER, Cuartero et al. (2004) reportan error medio de 1,1 m y RMS de 12,6 m; con 315 ICP (DGPS). Tanto Ludwig y Schneider (2006) como Toutin (2002) hallaron una alta relación entre el error vertical y la pendiente. En los tres casos se estudiaron áreas escarpadas con desniveles mayores a 1500 metros. Comparando estos resultados con los obtenidos en el presente trabajo, se detecta cierta disparidad. Una de las posibles razones es la expuesta por Ludwig y Schneider (2006), quienes observan que comparar el valor de un píxel con un punto en el terreno enfrenta el problema de la diferencia en la escala de observación. El análisis de los productos derivados de un MDE es una alternativa para su evaluación indirecta. En el presente trabajo se realizó una comparación entre MDE a través de las orto-imágenes. Los resultados indican que la divergencia entre los MDE se hace más grande cuando se incrementa la pendiente y que esta divergencia está distribuida según patrones espaciales asociados con la rugosidad del terreno (figura 4 y 5).

El método de estimación de exactitud planimétrica utilizado en el presente estudio demostró ser insensible a los cambios geométricos de las orto-imágenes realizadas con MDE de distinta procedencia y exactitud. Una razón probable es que los ICP utilizados en el cálculo se encuentran en zonas de baja divergencia entre ortorrectificaciones (tonos oscuros en la figura 3). Dicha relación se puso en evidencia luego del muestreo.

En Toutin et al. (2002) se desarrolla el modelo paramétrico riguroso utilizado en el presente trabajo, originalmente ideado para datos de baja resolución (Toutin 1995). En Toutin (1995), por medio de curvas calculadas con el modelo de ortorrectificación, se presenta la relación entre el ángulo de adquisición, la exactitud del MDE y el error planimétrico. Con estas curvas se obtuvo el error planimétrico esperado. Este fue de 1,5 metros cuando se ortorrectificó con SRTM-X, y 2 metros cuando se empleó el AGDEM (ángulo de adquisición = 8,7°; SRTM-X, Errorh = 8,7 m; AGDEM, Errorh = 20,2 m). Por lo tanto, la diferencia de exactitud esperada (0,5 m) no puede ser detectada por la intensidad de muestreo (19 ICP), dado que el intervalo de confianza de las medias muestrales son mayores que dicha diferencia (cuadro 2). El SRTM-C no se incluyó en este análisis por falta de normalidad y tendencia hacia los valores negativos.

Aguilar et al. (2007) realiza ortorrectificaciones de datos pancrómicos QuickBird (8° fuera del nadir) en un área ligeramente escarpada, utilizando MDE de resolución espacial de 20, 10 y 5 metros, con

RMSlineal de 5,82; 1,75 y 0,31 metros, respectivamente. Los autores utilizan 9 GCP y 79 ICP, reportando que el modelo se ajusta con RMSlineal de 0,65 metros. En las ortorrectificaciones obtienen un RMSlineal de 1,3; 0,78 y 0,71 metros, empleando los MDE de 20, 10 y 5 metros. En el presente trabajo, el RMSlineal de ajuste del modelo es más alto (2,12 m) que el reportado por Aguilar et al. (2007), incluso es más alto que los errores en la ortorrectificación, contrariamente a lo esperado. Pero los intervalos de confianza (cuadro 3) y el ANOVA (sin diferencias significativas) indican, refuerzan la interpretación de que la intensidad de muestreo no tiene la sensibilidad necesaria para detectar estas diferencias. Sin embargo, la cantidad de repeticiones es suficiente para detectar una tendencia de los errores en x, dado que son significativamente distintos a cero (cuadro 2). Esto puede atribuirse a las características del relieve y a la exactitud planimétrica de los MDE, ajustada sólo con datos orbitales. Tratándose de un valle con orientación N-S, el desplazamiento horizontal del MDE en sentido N-S (y) tiene menos impacto sobre la exactitud planimétrica, porque tiende a mantenerse en la misma curva de nivel.

El análisis integrado de los resultados obtenidos en el presente trabajo indica que la estimación de exactitud planimétrica y de error vertical en los MDE, no es válida para toda el área de estudio a causa del patrón de distribución espacial de los errores verticales en los MDE. Este patrón se pone de manifiesto en el análisis de la divergencia entre orto-imágenes (figura 4). El error en los MDE no se distribuye uniformemente en la superficie del área, sino que se encuentra espacialmente agregado. Por lo tanto, un diseño de muestreo estratificado puede mejorar la representatividad de la muestra (Steel y Torrie 1993). El mismo diseño debería aplicarse para las orto-imágenes a causa de la propagación del error vertical al error planimétrico.

CONCLUSIONES

En el área de estudio, el modelo SRTM-X es más exacto que el ASTER GDEM y el SRTM-C. Sin embargo, en algunos sectores y especialmente en las zonas de alta montaña, tiene errores de gran magnitud asociados a valores altos en la estimación de calidad anexa al producto. Se recomienda editar el SRTM-X antes de su utilización.

En las imágenes ortorrectificadas, el error planimétrico se encuentra espacialmente agregado a causa de la distribución espacial de los errores verticales en los MDE. Para obtener una estimación representativa de la exactitud planimétrica de una orto-imagen en terreno montañoso se requiere grandes esfuerzos de muestreo, siendo conveniente adoptar un diseño estratificado, con estratos establecidos a través de la rugosidad del terreno.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación fue realizado en el

marco del Proyecto de Investigación Científica y Tecnológica Orientada "Evaluación y Monitoreo de los Bosques Andino Patagónicos utilizando Técnicas de Percepción Remota Multisensor" (PICTO 36812), financiado por el Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (FONCYT) y cofinanciadores provinciales y nacionales de la Argentina. Se agradece al Fondo para las Américas y al Servicio de

Prevención y Lucha Contra Incendios Forestales (SPLIF) por los datos aportados y a Antje Siebert por la revisión del manuscrito. Los autores también expresan su reconocimiento a la Acción CYTED 508AC0352 de la Red Latinoamericana de Seguimiento y Estudio de los Recursos Naturales (SERENA).

BIBLIOGRAFIA

- Aguilar M, F Aguilar, F, F Agüera, J Sánchez. 2007. Geometric accuracy assessment of QuickBird basic imagery Using Different Operational Approaches. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 12(73):1321-1332.
- Atkinson PM, GM Foody. 2002. Uncertainty in Remote Sensing and GIS: Fundamentals. In Atkinson PM, GM Foody eds. *Uncertainty in Remote Sensing and GIS*. Inglaterra. Wiley. pp. 1-18.
- Cuartero A, A Felicísimo; F Arizaet. 2004. Accuracy of DEM generation from TERRA-ASTER stereo data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 35(B2):559-563.
- Gonçalves H, JA Gonçalves, L Corte-Real. 2009. Measures for an Objective Evaluation of the Geometric Correction Process Quality. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2(6):292-296.
- Greenwalt CR y ME Shultz. 1962. Principles of error theory and cartographic applications. Consultado 15 ene. 2010. Disponible en <http://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards-projects/accuracy/part3/tr96>
- Itten KI, P Meyer, T Kellenberger, R Leu, S Sandmeier, P Bitter, K. Seidel. 1992. Correction of the Impact of Topography and Atmosphere on Landsat-TM Forest Mapping of Alpine Regions. *Remote Sensing Series* Vol. 18. Dept. of Geography, University of Zurich. 48 p.
- Jensen J. 2000. Photogrammetry. In Jensen J eds. *Remote sensing of the environment. An Earth resource perspective*. Prentice-Hall, Inc, EEUU. p. 137-179.
- Kapnias D, P Milenov, S Kay. 2008. Guideline for best practice and quality checking of orthoimagery. Consultado 18 ene. 2010. Disponible en http://mars.jrc.it/mars/content/download/1231/7140/file/Orthoguidelines_v3_final.pdf
- Kay S, P Spruyt, Alexandrou. 2003. Geometric Quality Assessment of orthorectified VHR Space Image Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 5(69):484:491.
- Lencinas, JD, A Siebert. 2009. Relevamiento de bosques con información satelital: Resolución espacial y escala. *Quebracho* 17(1,2): 101-105.
- Ludwig R, P Schneider. 2006. Validation of digital elevation models from SRTM X-SAR for applications in hydrologic modelling. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 60:339-358.
- Reuter HI, T Hengl, P Gessler. 2009. Preparation of DEMs for Geomorphometric Analysis. In Hengl T, HI Reuter eds. *GEOMORPHOMETRY Concepts, Software, Applications*. Elsevier. pp. 87-120.
- Corbelle Rico E, ML Gil Docampo, J Armesto González, T Rego Sanmartín. 2006. La escala cartográfica de la imagen de satélite. Caso particular de las imágenes Ikonos y QuickBird. *Revista de Teledetección*. 26: 18-24.
- Rochini D, A Di Rita. 2006. Relief effects on aerial photos geometric correction. *Applied Geography* 25: 159-168.
- Sanchez Martin N, C Perez Gutierrez. 2005. Control geométrico de imágenes QuickBird para fines cartográficos. Consultado el 13 ene. 2010. Disponible en http://www.isprs.org/publications/related/semana_geomatica05/front/abstracts/Dimecres9/R26.pdf
- Steel R, J Torrie. 1993. *Bioestadística: principios y procedimientos*. Segunda edición. McGraw-Hill. 622 p.
- Toutin T. 1995. Multi-source data fusion with an integrated and unified geometric modelling. *EARSel Advances in Remote Sensing* 4(2):118-129.
- Toutin T. 2002. 3D topographic mapping with ASTER stereo data in rugged topography. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing* 40: 2241-2247.
- Toutin T. 2004. Review paper: geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. *International Journal of Remote Sensing* 25: 1893-1924.
- Toutin T. 2008. ASTER DEMs for geomatic and geoscientific applications: a review. *International Journal of Remote Sensing* 29(7):1855-1875.
- Toutin T, R Chénier, Y Carbonneau. 2002. 3D Models for High Resolution Images: Examples with Quickbird, IKONOS, and EROS. Consultado 15 abr. 2010. Disponible en http://geopub.nrcan.gc.ca/moreinfo_e.php?id=219879&h=toutin
- Toutin T, R Chénier. 2004. GCP requirement for high resolution satellite mapping. Consultado 15 abr. 2010. Disponible en <http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm3/papers/385.pdf>

