



VOL. 28, N° 1

JUNIO 2009

ISSN 0717-2915

**Revista
Journal**

SELPER

SOCIEDAD LATINOAMERICANA DE PERCEPCIÓN REMOTA Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN ESPACIAL
SOCIEDADE LATINO-AMERICANA EM SENSORIAMENTO REMOTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÃO ESPACIAL
LATINAMERICAN SOCIETY FOR REMOTE SENSING AND SPACE INFORMATION SYSTEMS

DIGITAL GLOBE™



Ciudad de Puerto Vallarta - México
Imágen de satélite QuickBird de DigitalGlobe



FOTO PORTADA

Puerto Vallarta - México

Imagen de satélite QuickBird de DigitalGlobe, producto Pansharpened resolución espacial 0.60 metros, en composición Color Natural (3,2,1) de la Ciudad de Puerto Vallarta tomada en el mes de Octubre de 2008. Los sectores que se destacan son el Puerto y el Aeropuerto. Esta ciudad fue sede del VIII Simposio Selper.



DIRECTORIO SELPER, SEDE CUBA 2008 - 2010
UCT GEOCUBA IC
Calle 4 No. 304, e/ 3ra y 3ra A
Miramar, Playa, La Habana, Cuba CP 11 300
E-mail: investigaciones@geocuba.co.cu

PRESIDENTE
Eloy Pérez
Cuba

VICE-PRESIDENTE
Silvia Lucero Casas
Mexico

VICE-PRESIDENTE
Myriam Ardila Torres
Colombia

VICE-PRESIDENTE
Pedro Luis García
Cuba

SECRETARIO GENERAL
María Antonia García Cisneros
Cuba

RESPONSABLE DE DIVULGACIÓN ELECTRÓNICA
Walter F. Sione
Argentina

TESORERO
Gastón Hernández
Cuba

COMITÉ DE RELACIONES INTERNACIONALES
Paulo Roberto Martini (Brasil)
Presidente
Aurelie Sand – Francia
Maurizio Fea – Italia
Alfredo Cuello – Argentina
Victor Barrena – Perú
Ramiro Salcedo – Venezuela
Myriam Ardila Torres / Colombia
María Elena Pezoa - Chile
Olga Piedad Rudas - Colombia
Anyul del Pilar Mora - Colombia
Luis Geraldo Ferreira - Brasil
Pedro Martínez Fernández - Cuba

COMITÉ EDITORIAL
María Cristina Serafini (Argentina)
Presidente
Miriam Esther Antes – Argentina
Leila María Fonseca – Brasil
Francisca Celia González – Argentina
Fabían Lozano – México
Jorge Luis Martín – Cuba
Freddy Flores. – Venezuela

COMITÉ DE EDUCACIÓN
Tania María Sausen (Brasil)
Presidente
Joao Avila - Brasil
Maria Antonia García Cisneros - Cuba
Andres Cárdenas - Colombia
Ethel Rubin de Celis Llanos - Perú

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
Rodolfo Ayala
Carrera de Topografía y Geodesia
Facultad Técnica
Universidad Mayor de San Andrés
Av. Arce 2299 1° Piso
La Paz, Bolivia
Tel.: 591-2-2441401

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
AYS Ltda
Calle Testinos 258 of 811
Santiago, Chile.
Tel: 562 - 6903768
Fax: 562 - 6903790
E-mail: jnovikov@codelco.cl

COLOMBIA
Myriam Ardila
PROSIS S.A.
Calle 94 A n° 11 A-70
Santa Fe de Bogotá, Colombia
Tel: 57-1-6357272
Fax: 57-1-6357190
E-mail: mardila@prosis.com

CUBA
Eloy Pérez García
UCT GEOCUBA IC
Calle 4 No. 304, e/ 3ra y 3ra A
Miramar, Playa, La Habana, Cuba CP 11 300
investigaciones@geocuba.co.cu

ECUADOR
José R. Aguiar V.
CLIRSEN
Edif. Instituto Geográfico Militar, Piso 4
Seniergues s/n y Paz y Miño
Apartado Postal 17-08-8216
Quito, Ecuador
Tel.: 593- 2- 254-3193
Fax: 593- 2- 255-5454
E-mail: clirsens@clirsens.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

GUAYANA 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

MÉJICO
Silvia Lucero Casas
UAM Agronomía y Ciencias
Universidad Autónoma de Tamaulipas
Centro Universitario Victoria
Cd. Victoria Tamaulipas, México
E-mail: scasas@uat.edu.mx

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: director@ssra.gub.uy

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: vbarrena@lamolina.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 Reiniger
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

FRANCIA
Aurelie Sand
CNES
31401- Toulouse Cedex 9
France
Tel: 33-1- 447.67500
Fax: 33-1-447.67849
E-mail: aurelie.sand@cnes.fr

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
Maurizio Fea
ESA/ESRIN
Via Galileo Galilei, 00044
Frascati, Italia
Casilla Postal 64
Tel: 39 - 694180940
Fax: 39 - 694180942
E-mail: Maurizio.Fea@esa.int

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

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

Jorge Luis Martín (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@ciba.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

Héctor del Valle
(CENPAT - Argentina)
Francisca González
(UNS - Argentina)
Mirta Aída Raed
(CSR, UNLu - Argentina)
Walter Sione
(UNLu - Argentina)

ÍNDICE TEMÁTICO

● SEGUIMIENTO DE LA REGENERACIÓN DE ÁREAS QUEMADAS A PARTIR DE IMÁGENES HIPERESPECTRALES AHS

Federico González-Alonso

Margarita Huesca

Sergio Martínez Sánchez-Palencia5

● EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN LA HIDROLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JUAN EN NUEVO LEÓN, MÉXICO

Axayácatl Maqueda Estrada

Jianhong Ren

, Diego Fabián Lozano García 13

● ANÁLISE DOS FATORES QUE CONTROLAM A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA TURBIDEZ NO RESERVATÓRIO DE ITUPARARANGA- SP

Leticia Sabo Boschi

Maria de Lourdes Bueno Trindade Galo

Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo..... 24

● ADECUACIÓN DEL DEM DEL SRTM DE 90 METROS PARA USOS HIDROLÓGICOS EN LLANURAS

Sergio Masuelli

Pablo M. Vazquez

Omar Faure 35

Editado por: SELPER Internacional
Universidad Nacional de Luján
Rutas 5 y ex 7, (6700) Luján - Bs. As. - ARGENTINA



PLAN EDITORIAL SELPER 2008 - 2010



PLAN EDITORIAL SELPER

Apartir 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 28 Número 1, donde se incluyen trabajos que han sido enviados por especialistas en el área de Teledetección y SIG que desarrollan sus actividades en diferentes instituciones de América Latina y nos brindan la oportunidad de conocer los alcances de estas herramientas aplicadas al estudio del espacio geográfico y los recursos naturales.

Estos trabajos han sido remitidos a expertos evaluadores para su revisión y aprobación. En este sentido es necesario destacar el invaluable apoyo brindado por el grupo de evaluadores, a quienes agradecemos muy especialmente por su labor.

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

Seguimiento de la regeneración de áreas quemadas a partir de imágenes hiperespectrales AHS

Federico González-Alonso (alonso@inia.es) (1) Margarita Huesca (alonso@inia.es) (1)
Sergio Martínez Sánchez-Palencia (2)

(1) Centro de Investigación Forestal. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria INIA, Crta. De la Coruña, km. 7,5, 28040 Madrid, Spain (e-mail: alonso@inia.es)
(2) Dirección General del Medio Natural. Junta de Comunidades de Castilla La Mancha. Toledo.

RESUMEN

En el presente trabajo se lleva a cabo un estudio en profundidad de la extensión de terreno afectada por el incendio forestal que se produjo en la provincia de Guadalajara (España) entre los días 16 y 21 de julio de 2005, estudiando el grado de afección del mismo con el fin de extraer conclusiones para el futuro. El fuego se inició en el paraje la Cueva de Casares, en el municipio de la Riba de Saelice y tuvo muy graves consecuencias ecológicas y personales. La teledetección supone una herramienta potente y versátil, que suministra información muy valiosa y que puede facilitar enormemente la toma de decisiones para la gestión forestal post-incendio. El objetivo principal de este estudio es realizar una cartografía de superficie quemada y grados de severidad, del incendio de Guadalajara, a partir de datos hiperespectrales analizando la capacidad de estos sensores para realizar un seguimiento de áreas quemadas, para ello el Laboratorio de Teledetección del CIFOR-INIA dispone en propiedad de una imagen de la zona quemada captada por el sensor hiperespectral aerotransportado AHS del INTA. La mencionada imagen hiperespectral constituye la información más completa de la zona afectada de que se puede disponer actualmente en Europa y muy probablemente en el mundo. Los resultados obtenidos muestran la utilidad de los sensores hiperespectrales como el AHS-INTA para realizar este tipo de estudios.

ABSTRACT

Burned areas monitoring using hyperspectral data
The present research studies the potentiality of hyperspectral data to monitor burned areas. The study area belongs to a coniferous forest area, situated in Guadalajara province (Spain) where a large forest fire occurred in July 2005. Several studies show remote sensing techniques provided an useful tool for forest fire monitoring which help decision making management. An AHS image, which cover the affected area, has been acquired by the Remote Sensing Laboratory of CIFOR-INIA delivered from

INTA. This image is the most complete information from the affected area in Europe and likely in the world. The main goal of this research is to burn areas mapping and analyze forest fire severity as accurate as possible using hyperspectral data. Burned forested areas have patterns of varying burn severity as a consequence of various topographic, vegetation, and meteorological factors. These patterns are detected and mapped using satellite data.

An accurate burn severity map can have significant implications for defining management strategies. The results of this study show that AHS images were accurate in order to analyze burned areas and to describe forest fire severity, which proves the usefulness of AHS data for forest fire area monitoring.

INTRODUCCIÓN

Cada año se estima una pérdida de 10 a 15 millones de hectáreas de bosque de regiones boreales y templadas a causa de los incendios forestales, siendo en España la principal causa de destrucción de recursos naturales, solamente en el año 2006, más de ciento cincuenta mil hectáreas fueron afectadas por este fenómeno en nuestro país (MIMAM, 2006). Los incendios forestales favorecen el cambio climático al emitir gases de efecto invernadero, concretamente dióxido y monóxido de carbono, metano y óxidos de nitrógeno y, a su vez, el cambio climático está incrementando el riesgo de incendios forestales, tendencia que seguirá aumentando en las próximas décadas (Levine, 1991). El área Mediterránea es una de las zonas donde se espera un efecto más significativo del cambio climático con un incremento de la aridez, lo que conllevaría un aumento del número de incendios. De igual forma, el fuego afecta notablemente al suelo a través del incremento de la temperatura y la deposición de cenizas, la desaparición de la vegetación y de los horizontes orgánicos total o parcialmente modificando la acción de la lluvia sobre la superficie del suelo, lo que podría ocasionar dinámicas de degradación del mismo de una importante magnitud, modificar el ciclo hidrológico y favorecer la

escorrentía. Estimar y evaluar la superficie afectada por un incendio de una forma rápida y precisa es de vital importancia a la hora de identificar áreas de intervención prioritaria para evitar o disminuir en la medida de lo posible ese proceso degradativo del suelo (González-Alonso et al., 2007).

La magnitud del impacto de un incendio forestal está directamente relacionada con la severidad del fuego definiéndose dicho término como la medida del nivel de daño ocasionado a la vegetación, materia orgánica y suelo. La severidad del fuego es un término descriptivo que integra los cambios físicos, químicos y biológicos que implica un incendio en el ecosistema (White et al., 1996). Tradicionalmente la superficie afectada por un incendio así como la severidad ocasionada por el mismo han sido cartografiados con trabajo de campo o desde un avión, el contorno exterior de la superficie afectada es habitualmente delimitando mediante la utilización de un GPS. Con la llegada de las imágenes de satélite la superficie afectada por el incendio así como la severidad del mismo puede ser cartografiada de una forma rápida, económica y efectiva.

El uso de la teledetección proporciona una cobertura espacial y temporal adecuada para este tipo de trabajos reduciendo el costoso trabajo de campo (Chuvieco et al., 2004). La integración de datos espaciales en un Sistema de Información Geográfica (SIG) permite almacenar y procesar una gran cantidad de datos, así como llevar a cabo análisis espaciales con información procedente de varias fuentes y con distintos formatos (Sunar y Özkan, 2001). Las imágenes de satélites han sido ampliamente utilizadas para la estimación de superficies afectadas por este fenómeno como lo muestran numerosos estudios (Merinode- Miguel et al., 2005; González-Alonso et al., 2005; Barbosa et al., 1999; Martín et al., 2002), sin embargo la discriminación de distintos grados de severidad dentro de esa área estimada no ha sido tan estudiada. En los estudios de severidad del fuego a partir de datos satelitales se han empleado principalmente imágenes de media a alta resolución espacial, como las proporcionadas por los satélites, Landsat, Spot entre otros (Millar et al., 2007; De-Santis et al., 2007). Recientes avances en la tecnología de la teledetección han conducido al desarrollo de instrumentos hiperespectrales, capaces de medir simultáneamente la radiación reflejada en una amplia gama de longitudes de onda. En estos sistemas, se adquieren un gran número de bandas espectrales para la misma área de la superficie terrestre, facilitando así discriminar rasgos de la cubierta que no serían perceptibles en determinadas regiones del espectro. Estos sensores de alta resolución espectral incluyen bandas muy estrechas, discriminando rasgos de absorción que no están accesibles a radiómetros más groseros. Hasta ahora no se han realizados muchos estudios que utilicen datos hiperespectrales en la cartografía de superficies quemadas y grados de severidad (Parra-Uzcátegui, 2005).

El presente estudio se centra en el incendio forestal ocurrido en la provincia de Guadalajara (España) entre los días 16 y 21 de julio de 2005, dicho incendio tuvo muy graves consecuencias ecológicas y personales. La magnitud y gravedad de este incendio hace que su estudio presente un gran interés, ya que podrían extraerse conclusiones que ayudarían a comprender la interacción entre factores que provocó un desenlace trágico desde el punto de vista humano y ecológico. Dichas conclusiones ayudarían a prevenir y tratar de evitar situaciones de alto riesgo de incendios en el futuro. El objetivo principal de este trabajo es estudiar la potencialidad de las imágenes captadas por el sensor hiperespectral aerotransportado AHS del INTA para evaluar la extensión del terreno afectado, así como el grado de severidad ocasionado por el incendio, realizándose también una primera estimación de la regeneración de la vegetación sobre el área afectada, y con toda esta información extraer conclusiones para el futuro que pueda facilitar enormemente la toma de decisiones para la gestión forestal post-incendio.

ÁREA DE ESTUDIO

El presente estudio se centra en el incendio forestal que se produjo en la provincia de Guadalajara, situada en la zona central de la Península Ibérica, entre los días 16 y 21 de julio de 2005. El fuego se inició en el paraje conocido como la Cueva de Casares, en el municipio de la Riba de Saelice, a causa de una barbacoa. El área afectada cuenta con una orografía complicada, caracterizada por un entramado de valles encajados con pendientes importantes, a esto hay que sumarle que durante los días del incendio las condiciones climáticas fueron muy desfavorables, con una humedad relativa que llegó a bajar del 20 por ciento, los vientos llegaron a ser de 30 a 50 kilómetros por hora y la temperatura superior a 30 grados centígrados favoreciendo enormemente la propagación del incendio, dificultando así notablemente la lucha contra el mismo, según estudios realizados por expertos, parece que dicho incendio se produjo bajo algunas de las condiciones más adversas que se han podido dar en la zona desde que se tienen registros climatológicos. También es importante destacar la alta continuidad espacial de la vegetación presente en la zona, dominada por *Pinus pinaster* y *Cistus laurifolius* entre otras. Siendo la primera especie una de las que presenta una mayor capacidad de inflamabilidad. La superficie afectada alcanza las 12.875 hectáreas, de las que 3.147 pertenecen al Parque Natural del Alto Tajo lo que representa un 2.9 por ciento de la superficie total del parque. La principal vegetación afectada corresponde a un pinar de pino resinero con un soto bosque de rebollo y quejigo y por un matorral acompañante dominado por jara, estepa y brezal. También es importante destacar la muerte de 11 personas pertenecientes a un retén al llevar a cabo las tareas de extinción del mismo.

MATERIAL

El laboratorio de Teledetección del CIFOR -INIA dispone en propiedad de dos imágenes de la zona quemada captada por el sensor hiperespectral aerotransportado AHS del INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial). El sensor AHS es un sensor hiperespectral aerotransportado de barrido mecánico (whiskbroom scanner). El AHS está instalado a bordo de la aeronave CASA C-212 del INTA, adecuadamente equipada para realizar campañas de teledetección. El AHS posee 80 bandas, cubriendo las regiones espectrales VIS/NIR, SWIR, MIR y TIR y cuyos anchos de banda varían según la región.

El primer vuelo se realizó el 6 de octubre de 2005, antes de las primeras lluvias, por lo que refleja la situación del terreno tras el paso del fuego. La mencionada imagen hiperespectral constituye la información más completa de la zona afectada de la que se puede disponer actualmente en Europa y muy probablemente en el mundo. La campaña fue compuesta por 7 pasadas paralelas, con rumbos que coinciden con el plano solar de forma que se eviten o en todo caso minimicen posibles problemas de iluminación diferencial. Además los ejes de vuelo de pasadas se trazan para que las imágenes posean cierto solape que permitirá componer a posteriori un mosaico de imágenes (figura 2). El segundo vuelo se llevó a cabo el 6 de octubre de 2006, exactamente un año después de la campaña anterior.

Para mantener estables las condiciones de adquisición de las imágenes se conservó la configuración de vuelo de la campaña anterior, manteniendo los rumbos de las pasadas y la hora de adquisición de las imágenes de forma que se minimicen los efectos de las diferencias en la iluminación que pueden producirse sobre las imágenes.

En la figura 1 puede verse la orientación y cobertura de las pasadas y en la figura 2 se muestra el mosaico de la imagen del año 2005 utilizando una composición en falso color.

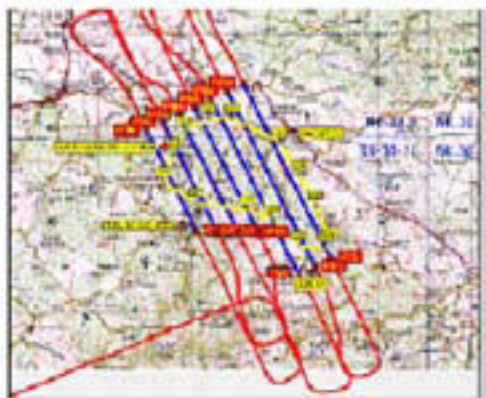


Figura 1. En esta figura están representados en azul las pasadas realizadas, y en rojo la trayectoria del vuelo de toma de imágenes hiperespectrales AHS realizado el 6 de octubre de 2005 sobre la zona afectada por el incendio del Rodenal (Guadalajara). En amarillo aparece el contorno exterior aproximado del incendio. Sobre cartografía E 1: 250 000



Figura 2. Mosaico, en falso color, formado por las siete pasadas del vuelo AHS-INTA realizado el 6 de Octubre de 2005

MÉTODOS

Trabajo de campo

Se han realizado cuatro visitas al área afectada por el incendio del Rodenal, los días 6, 17 y 25 de octubre de 2005 y el 1 de junio de 2006, cada una de ellas de uno o más días de duración. En la primera de estas visitas se realizó un reconocimiento general del área afectada por el incendio y se tomaron datos destinados a la elaboración de un muestreo estadístico del área. En las siguientes visitas se tomaron los datos de campo en las parcelas elegidas siguiendo el protocolo de toma de datos de campo elaborado previamente. Debido a las limitaciones de tiempo y personal fue necesario plantear una campaña de muestreo que permitiera evaluar las variables necesarias de una forma rápida, para poder cubrir el máximo de superficie. Asimismo, fue necesario estratificar la superficie de estudio según los criterios que se consideraron más convenientes (tipo de vegetación, grado de afección, cercanía a carreteras) para muestrear las zonas de mayor interés. Se trató de cubrir con puntos de muestreo todas las combinaciones posibles de grado de severidad y tipo de vegetación previa al incendio. Se tomaron dos tipos de puntos de muestreo: Los Puntos A definidos como los localizados en zonas quemadas para estimar el grado de severidad causado por el incendio. Y los Puntos B, puntos tomados en zonas no quemadas, utilizados para definir zonas de entrenamiento (endmember) de vegetación sana y suelo desnudo (quemado y no quemado).

Estos puntos se tomaron en los alrededores de la zona afectada por el incendio, considerando puntos que comprendían todos los tipos de formaciones vegetales presentes en la zona. Los datos tomados de cada parcela del grupo B fueron: una fotografía del aspecto de la zona en la que se localiza el punto, coordenadas GPS del punto de muestreo, composición florística previa al incendio, tipo estructural de vegetación previa al incendio, según la

clave de Marchetti y la altura de hojarasca y mantillo (hasta llegar al suelo mineral). En los puntos del grupo A además de los datos anteriores se estimó el grado de severidad.

La información de campo será utilizada para validar la cartografía obtenida de la estimación de los grados de severidad del incendio.

Corrección radiométrica y geométrica de las imágenes AHS

Las imágenes AHS de los años 2005 y 2006 han sido corregidas geométricamente utilizando un método de correlación con ventanas móviles a lo largo de las imágenes para evaluar así su ajuste geométrico y permitir una corrección geométrica con una precisión mayor que la conseguida con los métodos tradicionales (Prado-Ortega, 2007). Reducir los errores en la geolocalización de los píxeles es de gran importancia en los estudios multitemporales. El paso de radiancias a reflectancias fue realizado con la ayuda del software ATCOR4 para cada una de las pasadas que comprende el vuelo del 2005. El cálculo de reflectancias para las pasadas del vuelo del año 2006 se ha realizado mediante un análisis estadístico de las radiancias y reflectancias del 2005 y su posterior aplicación a las pasadas del vuelo del 2006.

Estimación de la superficie afectada por el incendio forestal

Para la delimitación del perímetro y la estimación de la superficie afectada se realizó un análisis de "Matched Filtering" sobre la imagen para enfatizar la zona quemada, este método asigna a cada píxel un valor de probabilidad de pertenecer a una clase, dicha clase se ha definido con un conjunto de píxeles de entrenamientos o "endmember", dicho endmember se definió mediante la selección 100 píxeles de la imagen que presentaran un grado de quemado considerable. A continuación se realizaron unas clasificaciones no supervisadas utilizando el algoritmo Isodata, con dos clases quemado y no quemado, modificándose los umbrales inferiores del histograma hasta alcanzar la máxima precisión posible. Este método ha sido seleccionado por los buenos resultados obtenidos en trabajos anteriores (Merino-de-Miguel et al., 2005).

Los resultados obtenidos con las imágenes AHS serán posteriormente comparados con los resultados de aplicar la misma metodología a imágenes multiespectrales con distintas resoluciones espaciales.



Figura 3. Mosaico AHS del 6 de octubre de 2005, en falso color, y superficie clasificada como superficie afectada por el incendio en rojo

Estimación de la severidad del incendio forestal

La severidad del incendio ha sido estimada mediante la utilización del índice "Normalized Burn Ratio" basado en la combinación de las bandas del infrarrojo cercano y el infrarrojo medio utilizando el siguiente algoritmo:

$$NBR = (?icr - ?im) / (?icr + ?im);$$

Donde ?icr y ?im representan las reflectancias del infrarrojo cercano e infrarrojo medio respectivamente. La banda del infrarrojo cercano es sensible a la actividad fotosintética de la vegetación mientras que la del infrarrojo medio proporciona información del contenido de agua esto hace que el índice NBR sea especialmente sensible a la detección de cambios entre la vegetación viva y el contenido de humedad así como de algunos cambios producidos en el suelo como consecuencia de la actividad del fuego (Key y Benson, 2005). El índice NBR fluctúa entre -1 y +1. Valores bajos de índice indican severidad alta mientras que valores altos severidad baja o inexistente.

Para una mejor comprensión de los resultados obtenidos, la imagen será clasificada utilizando una clasificación no supervisada con el algoritmo IsoData, en tres grados de severidad, severidad alta, media y baja. La validación de dicha cartografía se realizará mediante un análisis por matrices de confusión entre los resultados obtenidos y las parcelas del trabajo de campo anteriormente descritas.

Primera estimación de la regeneración de la vegetación

El estudio de la regeneración se ha realizado mediante el uso del índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI (Díaz-Delgado et al., 1998), dicho índice se basa en la combinación de las bandas roja e infrarroja cercana del espectro electromagnético. El NDVI detecta la actividad fotosintética o grado de verdor existente en un píxel permitiendo así el estudio del desarrollo de la vegetación. NDVI varía entre -1 y 1, cuanto más elevado sea el índice mayor será la actividad fotosintética registrada en el píxel y de forma contraria cuanto más bajo sean los valores de NDVI mayor presencia de suelo desnudo encontraremos. El NDVI está formulado de la siguiente forma:

$$NDVI = (?irc - ?r) / (?irc + ?r);$$

Donde ?icr y ?r representan las reflectancias del infrarrojo cercano y rojo respectivamente.

Dichas bandas están centradas a las longitudes de onda de 0.8 µm la del infrarrojo cercano y a 0.6 µm la del rojo.

El grado de regeneración ha sido calculado utilizando como algoritmo la diferencia de NDVI entre los años 2006 y 2005.

La siguiente tabla muestra un resumen de la superficie afectada por dicho incendio estimada a partir de las imágenes MODIS, MERIS, LANDSAT,

AWiFS y AHS y la relación con los datos oficiales proporcionados por el Ministerio de Medio Ambiente.

	Superficie afectada (ha)	Ha de exceso (+) defecto (-)	% de exceso (+) - defecto (-)
Ministerio Medio Ambiente	12.887,37	0,00	0,00
MODIS	11.132,20	- 1.755,17	- 13,62
MERIS	12.564,00	- 323,37	- 2,51
LANDSAT	11.087,370	- 1800	- 13,57
AWiFS	12.479,040	- 408,33	- 3,17
AHS	12.983,50	+ 96,13	+ 0,74

Tabla 1. Superficie afectada (ha) por el incendio del Rodenal en Guadalajara

Se puede observar como la superficie estimada con las imágenes AHS se acerca con mayor precisión a las cifras proporcionadas por el Ministerio de Medio Ambiente, quedando así justificada la utilización de los datos hiperespectrales para la estimación del perímetro así como del área afectada tras un incendio forestal.

Estimación de la severidad del incendio forestal

La estimación de los grados de severidad se ha realizado a partir del índice NBR, explicado anteriormente, como consecuencia de la alta resolución espectral de las imágenes AHS, antes del cálculo de dicho índice se realizó un análisis para la determinación de las bandas que mejor representaban las zonas del espectro infrarrojo cercano e infrarrojo medio que intervienen en el cálculo de dicho índice. El criterio elegido para dicha selección de bandas, esta basado en aquellas que presenten un menor ruido y una máxima variabilidad. Los resultados obtenidos muestran que la banda que mejor representa la zona del espectro del infrarrojo cercano es la banda número 13 centrada a una longitud de onda de 0.8 μm y para el infrarrojo medio las bandas 31, 38 y 41 centradas a unas longitudes de onda de 2.13, 2.22 y 2.25 μm respectivamente. De esta forma se calcularon tres índices de severidad definidos por NBR1, NBR2 y NBR3. Se realizaron de esta forma tres clasificaciones de grados de severidad distintas correspondientes a los tres índices de severidad calculados. Utilizando el trabajo de campo como validación de la cartografía obtenida se comprobó que la clasificación más precisa se alcanzaba con el índice de severidad NBR1 calculado a partir de la banda 31 del infrarrojo medio centrada a 2.13 μm , obteniéndose una fiabilidad del 70%.

La siguiente figura muestra la cartografía de los grados de severidad obtenida utilizando el índice NBR1.

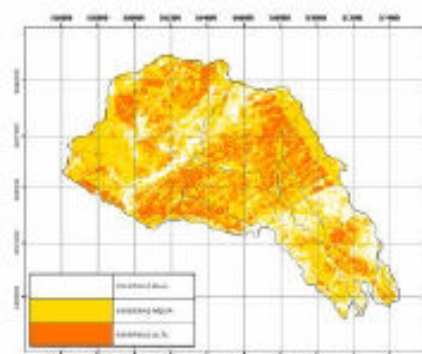


Figura 4. Cartografía de los grados de severidad del incendio del Rodenal en Guadalajara, a partir del índice NBR1

En la figura 4 se puede observar la distribución espacial de la severidad del incendio del Rodenal ocurrido en Guadalajara en el 2005. La severidad se ha definido como el impacto del fuego sobre la vegetación distinguiéndose tres grados de severidad de incendio. Severidad baja representada por los colores blancos, severidad media con tonos amarillos y finalmente los tonos anaranjados representan las zonas de severidad alta. Se puede observar que la zona más afectada por dicho incendio se sitúa en una franja central del área afectada con una orientación suroeste – noreste. La severidad predominante es la clasificada como severidad media representada por 7.286,0841 ha seguida por las zonas de severidad alta con 2.544,8490 ha, siendo la superficie clasificada como severidad baja la que comprende una menor superficie con 3.152,5740 ha. Analizando el modelo digital de terreno se puede observar la gran dependencia entre grados de severidad y relieve. Las zonas de mayores pendientes por lo general muestran un grado de severidad mayor que las zonas más llanas. La información obtenida de la cartografía presentada, puede ayudar en gran medida al gestor en los trabajos de restauración de la zona afectada, así como en la planificación de futuros planes de prevención de incendios.

Primera estimación de la regeneración

La siguiente figura representa la diferencia de NDVI entre los años 2006 y 2005



Figura 5. Cartografía de la primera estimación de la regeneración en el periodo 2005-2006 en el incendio del Rodenal de Guadalajara

En la figura 5 se puede observar la distribución espacial del grado de regeneración observado en el periodo 2005 -2006, calculado a partir del índice de vegetación NDVI. Para una mejor interpretación de los resultados se han definido tres grados de regeneración representados por tonos verde oscuro las zonas con una regeneración alta, los verdes claro representan zonas donde se ha producido una regeneración media y las zonas donde no ha habido regeneración o esta ha sido muy baja están representadas con tonos amarillos. Las zonas con un grado de regeneración mayor se sitúan en la parte norte del área afectada mientras que las menos regeneradas se presentan en la zona sur definiendo una franja con orientación noroeste – sureste. Se puede observar que la mayor parte de la zona afectada por el incendio presenta un grado de regeneración bajo (5.219,9105 ha) o medio (4.850,0069 ha), mientras que las zonas con una regeneración alta representan una superficie de 2.913,5826 ha.

La opinión de los expertos ha permitido confirmar el grado de precisión obtenido en la cartografía anteriormente expuesta. El trabajo de campo que será proporcionado por la Junta De Castilla La Mancha en breve, permitirá una validación con un mayor rigor científico.

Finalmente se realizó un cruce entre la severidad del incendio y los grados de regeneración de la vegetación para localizar las zonas de principal actuación, siendo estas representadas por aquellas zonas donde la severidad del incendio ha sido clasificada como alta y la regeneración del mismo baja o prácticamente nula. La siguiente figura representa el cruce de ambas cartografías señalándose las tres zonas de principal actuación (figura 6).

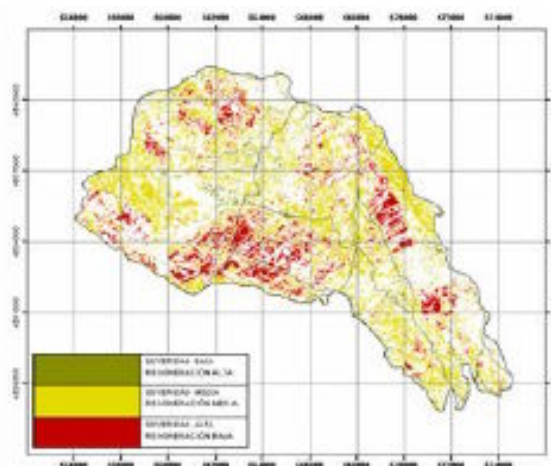


Figura 6. Cruce de los grados de severidad del incendio con los grados de regeneración de la vegetación

Las zonas rojas son aquellas donde coincide una severidad alta con una regeneración baja, luego son las zonas de prioridad a la hora de realizar actuaciones de mejora. Dichas zonas de prioridad están representadas en la figura 6 mediante una elipse negra, el área 1 ocupa una superficie de 1.531 ha, el área 2, 376 ha y el área 3 ocupa una superficie de 124 ha. Esta cartografía facilita en gran medida la toma de decisiones para la gestión forestal postincendio.

CONCLUSIONES

Tras producirse un incendio de las características del incendio de Guadalajara surge la necesidad de conocer la extensión de terreno afectado, el grado de afección, y de estudiar en profundidad lo ocurrido, con el fin de extraer conclusiones para el futuro. Es asimismo prioritario en los años siguientes analizar cómo avanza la regeneración, con el fin de gestionar la masa de la forma más adecuada. Para todas estas cuestiones que se les plantean a los gestores forestales en las zonas afectadas por incendios, el presente estudio muestra que la teledetección supone una herramienta potente y versátil, que suministra información muy valiosa ya que puede facilitar enormemente la toma de decisiones para la gestión forestal post-incendio.

Respecto a la capacidad de las imágenes hiperespectrales AHS para discriminar la superficie afectada por el incendio de Guadalajara podemos señalar la gran precisión de los resultados comparados con los obtenidos con otros sensores multispectrales, lo que confirma nuestra hipótesis de partida de la utilidad de este tipo de imágenes para la obtención de cartografías de áreas quemadas..

Los resultados obtenidos en el estudio de la severidad, nos lleva de igual forma a confirmar la capacidad de este sensor para discriminar entre diversos grados de severidad provocados por un incendio forestal. La clasificación de una escena

posterior al incendio, utilizando el índice de severidad NBR1, ofrece unos resultados bastante fiables demostrando la utilidad de la teledetección para la obtención de este tipo de cartografías aportando una herramienta de apoyo al gestor de una forma fiable, rápida y económica comparada con los métodos tradicionales de trabajo de campo y foto-interpretación.

Conclusiones que pueden ser extrapoladas al estudio que se ha realizado de estimación de los grados de regeneración de la vegetación.

Finalmente, se considera esencial explotar la información contenida en la imagen AHS, con el fin de obtener cartografía detallada de los distintos grados de severidad causados por el incendio, de la temperatura del suelo (muy influyente en la regeneración natural) y conocer la relación entre la severidad producida y la biomasa acumulada en la zona entre los Inventarios Nacionales Forestales Segundo y Tercero, así como la relación entre severidad y especies presente antes del incendio. Estos datos podrán combinarse también con aquellos relativos a la evolución y características del incendio que se encuentran disponibles en los Servicios Forestales de Castilla – La Mancha. El estudio

conjunto de todos estos factores permitiría comprender mejor el comportamiento del fuego y sus efectos, y extraer conclusiones aplicables a la gestión de futuros incendios. Se considera también de gran interés realizar un seguimiento riguroso de la regeneración que se produzca en la zona durante los próximos años, empleando imágenes AHS y datos tomados de campo. Esto permitirá analizar las pautas de regeneración de las distintas especies, y relacionarlas con los grados de severidad y la temperatura del suelo tras el paso del fuego.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se ha realizado en el marco del Convenio CC06-021 firmado entre el INIA y la Junta de Comunidades de Castilla La Mancha para el estudio del incendio del rodenal de Guadalajara.

Los autores agradecen al Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial la ayuda prestada en la adquisición y corrección de las imágenes hiperespectrales AHS empleadas en la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- BARBOSA, P.M., GREGOIRE, J.L. y PEREIRA, J.M. 1999. An algorithm for extracting burned areas from time series of AVHRR GAC data applied at a continental scale. *Remote Sensing of Environment*. 69: 253-263.
- CHUVIECO, E. y MARTÍN, M. P. 2004. Nuevas Tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Economía y Geografía. Colección de estudios ambientales y socioeconómicos.
- DE SANTIS, A. y CHUVIECO, E. 2007. Burn severity estimation from remotely sensed data : Performance of simulation versus empirical models. *Remote Sensing of Environment*, 108: 422-435.
- DÍAZ-DELGADO, R., SALVADOR, R., y PONS, X. 1998. Monitoring of plant community regeneration after fire by remote sensing. In: L. Trabaud (Ed.), *Fire management and landscape ecology*. Fairfield, WA: International Association of Wildland Fire. pp 315-324
- GONZÁLEZ-ALONSO, F., MERINO-DE-MIGUEL, S., ROLDÁN-ZAMARRÓN, A., GARCÍA-GIGORRO, S. y CUEVAS, J. M. 2007. MERIS Full Resolution data for mapping level-of-damage by forest fires: the Valencia de Alcántara event in August 2003. *International Journal of Remote Sensing*. 28: 797-809.
- GONZÁLEZ-ALONSO, F., MERINO-DE-MIGUEL, S., ROLDÁN-ZAMARRÓN, A., GARCÍA-GIGORRO, S. y CUEVAS, J.M. 2005. Algoritmos de estimación de superficies quemadas a partir de compuestos MODIS. XI Congreso Nacional de Teledetección, 21-23 septiembre 2005. Puerto de la Cruz. Tenerife.
- KEY y BENSON. 2005. C. H. Key and N. C. Benson, Landscape assessment: Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. In: D. C. Lutes et al., Editors, FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system, General Technical Report, RMRS-GTR-164-CD:LA1-LA51, USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Ogden, UT (2005).
- LEVINE, J. S. 1999. Introduction In *Global Biomasa Burning: Atmospheric, Climatic and Biospheric Implications* edited by J. S. Levine (Cambridge, USA: MIT press), pp. xxv – xxx.
- MARTÍN, M.P., DÍAZ DELGADO, R., CHUVIECO y G. VENTURA, G. 2002. Burned land mapping using NOAA-AVHRR and TERRA-MODIS. *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety* (Viegas. Ed). Millpress, Rotterdam.
- MERINO-DE-MIGUEL, S., GONZÁLEZ-ALONSO, F., GARCÍA-GIGORRO, A., ROLDÁN-ZAMARRÓN, A. y CUEVAS, J.M. 2005. Is it possible to timely and accurately estimate wildfire burnt areas using remote sensing techniques? En: *New Strategies for European Remote Sensing* (Oluic, Ed). Millpress, Rotterdam.
- MILLER, J. D. y THODE, A. E. 2007. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta normalized burn ratio (DNBR). *Remote Sensing of Environment*. 109: 66-80.
- MIMAM. 2006. Ministerio de Medio Ambiente (España), Estadística incendios forestales. http://www.mma.es/portal/secciones/biodiversidad/d_efensa_incendios/estadisticas_incendios/in dex.htm (accessed on March 2006).
- PARRA UZCÁTEGUI, A. 2005. Estimación de niveles de severidad del fuego a partir de datos hiperspectrales EO-1 Hyperion. Tesis doctoral, Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá de Henares, Madrid, España.
- PRADO ORTEGA, E. 2007. Mejoras en la evaluación y corrección de errores de registro en imágenes hiperspectrales AHS para estudios multitemporales. Trabajo de investigación tutelada, Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá de Henares, Madrid, España.
- SUNAR, F. y ÖZKAN, C. 2001. Forest fire analysis with remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 12: 2265 – 2277.
- WHITE, J.D., RYAN, K. C., KEY, C. C. y RUNNING, S.W. 1996. Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery. *International Journal of Wildland Fire*, 6: 125-136

Evaluación del impacto del cambio de uso de suelo en la hidrología de la cuenca del Río San Juan en Nuevo León, México.

Axayácatl Maqueda Estrada 1, Jianhong Ren 2, Diego Fabián Lozano García 3

1 Investigador del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Av. Eugenio G. Sada

2501, Monterrey, México, CP 64849 axa.maqueda@itesm.mx Tel. (52) 8183582000 ext 5288

2 Investigadora de la Universidad Texas A&M Kingsville, Environmental Engineering Department, 700 University Blvd. MSC 367, Kingsville, TX, USA. CP 78363 jianhong.ren@tamuk.edu Tel (361) 5932798

3 Coordinador del Laboratorio de Sistemas de Información Georreferenciada del ITESM Monterrey, Av. Eugenio G. Sada 2501, Monterrey, México CP 64849 dflozano@itesm.mx Tel 8183582000 ext 5288.

RESUMEN

La relación entre el tipo de cobertura del suelo de una cuenca y su comportamiento hidrológico ha sido descrita por muchos autores de diversas publicaciones. El tipo de cobertura del suelo, los bosques en particular, son uno de los factores de mayor influencia para la hidrología de una cuenca. Los bosques incrementan la infiltración del agua en el suelo, este proceso reduce el escurrimiento superficial por lo tanto reduce el potencial de inundación. La conversión de áreas boscosas a áreas urbanas o para la agricultura incrementará el escurrimiento de los ríos. Este artículo presenta un caso de estudio conducido a nivel cuenca. El propósito de este proyecto es evaluar el efecto del potencial cambio de cobertura del suelo en la cuenca del Río San Juan causado por el crecimiento de las áreas urbanas. El modelo utilizado fue AGWA (Automated Geospatial Watershed Assessment Tool) basado en SIG. Datos históricos de cobertura de suelo y escurrimientos del Río San Juan fueron utilizados como información para alimentar el modelo. El modelo permitió dividir la cuenca en seis regiones e intentar predecir los escurrimientos de agua en base a condiciones futuras de cobertura del suelo. Los resultados del modelo muestran que sólo hay cambios pequeños en los escurrimientos a nivel cuenca durante el periodo estudiado ya que sólo se han transformado subcuencas que cubren el 23.5 % del área de estudio. Sin embargo, todo el impacto está concentrado en dos subcuencas (Áreas Urbanas y Cañón del Huajuco).

En la subcuenca de Áreas Urbanas se predice un incremento de hasta 63.5% en el escurrimiento superficial cuando el área cubierta por superficies impermeables aumente en 18.7% para el año 2020.

Para el Cañón del Huajuco hay una tendencia similar. Por lo tanto, el peligro de inundación aumenta debido al incremento del escurrimiento superficial durante la temporada de lluvias y puede haber una escasez local de agua debido a la caída de la infiltración y flujo base del río durante la época de estiaje en las subcuencas de Áreas Urbanas y Cañón del Huajuco.

ABSTRACT

This project evaluates the effect of potential landcover change on surface runoff generation in the San Juan River Watershed caused by population growth. A GIS based computer model, the Automated Geospatial Watershed AssessmentTool (AGWA), was used. Historical land cover type and river flow data available for the San Juan River watershed were used as model inputs and for model calibration, respectively. The computer model discretizes the watershed into six small units and predicts the watershed hydrology for future land cover conditions. Simulation results show minor changes in water flows at the watershed scale through the study period because subwatersheds that have land cover change make up only 23.5% of the study area. All the impact is concentrated in two subdivided regions (the urban areas and the Huajuco Canyon regions). In the urban areas, there is an increase up to 63.5% in surface flow when the area covered by the impervious surfaces grows 18.7% by 2020. For the Huajuco Canyon, there is a similar tendency. Flood hazard may increase due to increases in surface runoff during the wet season. There may be a local scarcity of surface water due to the dramatic decrease in percolation and baseflow during the dry season in the Huajuco Canyon and urban areas. The land cover change effect during an extreme rainfall event was evaluated using the rainfall event that occurred during Hurricane Gilbert in 1998. Simulation results show that land cover has a minimum influence on the volume of surface flow produced by this rainfall event.

INTRODUCCIÓN

La degradación del medio ambiente en México se ha vuelto una preocupación a nivel nacional. Este problema puede afectar la gobernabilidad de la sociedad. Problemas como la erosión acelerada del suelo, la deforestación, la escasez de agua y la pérdida de biodiversidad son considerados ahora como el origen de muchos conflictos sociales en México. Debido a estos conflictos, los temas

relacionados con el manejo de bosques y recursos hídricos son considerados como asuntos de seguridad nacional (Cotler et al., 2004). La cuenca del Río San Juan comprende un área de 32,789 kilómetros cuadrados y está localizada en los estados de Nuevo León y Coahuila como se muestra en la figura 1. El principal usuario del agua de la cuenca es la ciudad de Monterrey. El área metropolitana de la ciudad tiene ahora cerca 4 millones de habitantes y se espera que haya 5.1 millones en el año 2020. Para cumplir con las necesidades de la población creciente es necesario desarrollar al menos 25,000 hectáreas de nuevas áreas urbanas adicionales a las actuales 57,500 hectáreas (Guajardo, 2003). El crecimiento de las áreas urbanas implica la transformación de matorral, bosque o zonas agrícolas en materiales impermeables como concreto y asfalto. Una importante correlación entre el tipo de cobertura de suelo en una cuenca y su hidrología ha sido descrita en varias publicaciones (e.g. Taniguchi, 1997). La cobertura del suelo, particularmente los bosques, es uno de los factores que más influyentes en la hidrología de una cuenca.

Los bosques permiten una alta infiltración de agua en el suelo, que minimiza el escurrimiento superficial y transforma el potencial escurrimiento superficial en agua subterránea evitando inundaciones. El agua subterránea fluye más lentamente hacia manantiales y corrientes principales, y evita que las corrientes superficiales se sequen durante el estiaje (Kostadinov et al., 1998). Un incremento significativo en escurrimientos de ríos causado por la conversión de bosques a áreas agrícolas ha sido observado por varios investigadores previamente (e.g. Heil et al. 2003; Williamson et al., 1987). Una reducción significativa del escurrimiento superficial después del incremento de cobertura vegetal del suelo fue

demostrada por Descheemaeker et al. (2006). Este artículo presenta un caso de estudio a nivel cuenca.

El propósito de este proyecto fue evaluar el efecto del cambio de cobertura de suelo en la hidrología de la cuenca (infiltración, escurrimiento superficial, y flujo base del río). El modelo basado en SIG (sistemas de información geográfica), AGWA fue utilizado. Datos históricos del tipo de cobertura de suelo y escurrimientos del Río San Juan fueron utilizados como entradas y calibración para el modelo.

ENFOQUE Y METODOLOGÍA

Descripción del área de estudio

El área de estudio es una fracción de la cuenca del Río San Juan en México como se muestra en la Figura 1. El Río San Juan representa el 6.35% del área total de drenaje de la cuenca del Río Bravo. La extensión del área de estudio es de 3,488 kilómetros cuadrados. La lluvia promedio anual es de 414 mm (CNA, 2005). 57% del área de la cuenca tiene un clima semicálido con una temperatura promedio anual entre 18 y 22 grados Celsius. La otra parte de la cuenca (43%) tiene un clima semiárido con una temperatura promedio anual superior a los 22 grados Celsius. La escasez de agua en la cuenca es causada principalmente por factores climáticos como altos niveles de evaporación debido a altas temperaturas promedio anuales. Además, la mayor parte de la lluvia ocurre entre Julio y Octubre cuando se presentan las temperaturas más altas del año. Por lo tanto el agua es escasa a pesar de que hay lluvias acumuladas anualmente relativamente altas, de 600 a 1200 mm (INEGI, 1990). Vientos dominantes del Golfo de México chocan con las montañas de la cuenca y concentran la mayor parte de la lluvia en la cara este de la zona montañosa (Figura 2).



Figura 1. Área de estudio

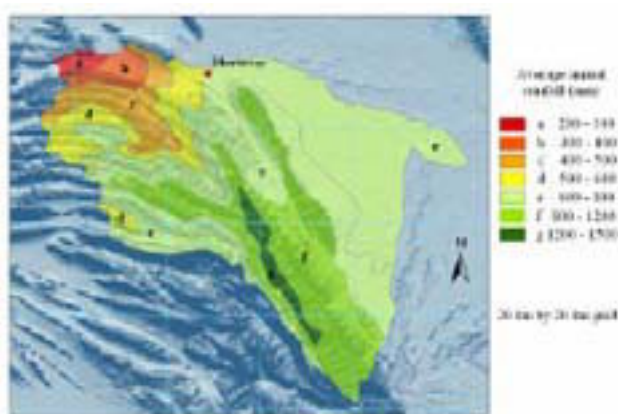


Figura 2. Distribución de la lluvia en el área de estudio y de los índices utilizados.

El área de estudio fue dividida en seis subcuencas que se nombraron Zona Agrícola, Bosque, Área Suburbana, Cañón del Huajuco, Cañón de la Huasteca y Áreas Urbanas. La Figura 3 muestra el área de estudio por subcuenca y de fondo una imagen Landsat de 1998. La Zona Agrícola que está cubierta por pastizales y huertas citrícolas cubre 694 km² o 19.7% del área de estudio. La mayor parte de esta subcuenca son áreas planas a excepción de algunas montañas en su extremo oeste. La región de Bosque

cubre 527.8 km² o 15% del área de estudio, toda esta subcuenca está en una zona montañosa con alturas superiores a los 3,000 m.s.n.m. A pesar de existir pequeñas áreas agrícolas la mayor parte de la subcuenca está cubierta por bosques. El Cañón del Huajuco está al sur de Monterrey y abarca 370 km² o 10.5% del área de estudio y se encuentra en un proceso de acelerada urbanización. La cobertura del suelo es bosques en las montañas y matorral en los valles. Las nuevas áreas urbanas se encuentran en

los valles. El Cañón de la Huasteca es una subcuenca aislada por las altas montañas, por lo tanto la lluvia es considerablemente menor que en las otras subcuencas. Abarca 1,145 km² o 33% del área de estudio. Esta subcuenca está cubierta en su totalidad por montañas. La cobertura del suelo es escasa, matorral desértico en pendientes pronunciadas. Esta subcuenca está cubierta en su totalidad por montañas. La cobertura del suelo es escasa, matorral desértico

en pendientes pronunciadas. La subcuenca de Áreas Urbanas es pequeña comparada con el resto del área de estudio, comprende solamente 445 km² o 13% del total y está cubierta principalmente por la ciudad de Monterrey. La cobertura del suelo en esta área es principalmente asfalto y concreto. La subcuenca de Área Suburbana cubre sólo 9% del total y está formada por desarrollos urbanos de baja densidad y zonas agrícolas.

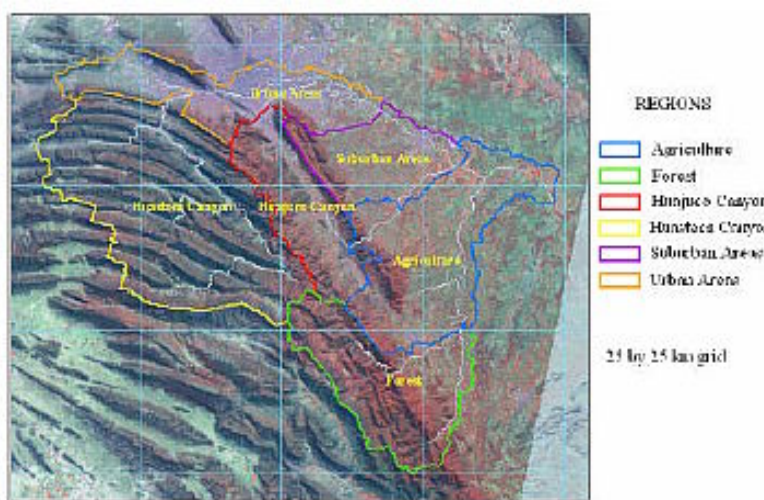


Figura 3. Imagen LandsAT del área de estudio y su división en 6 subcuencas

El modelo de lluvia-escurrimiento

La herramienta AGWA 1.5 fue utilizada en este estudio (Miller et al., 2002). AGWA contiene a su vez el modelo SWAT (Soil & Water Assessment Tool, the SWAT model) (Arnold, 2000). SWAT es un modelo diseñado para predecir los efectos de prácticas de manejo de la tierra (agricultura, pastoreo, desarrollo urbano) en la hidrología de cuencas grandes con diferentes tipos de suelo y por periodos más grandes a un año. Es un modelo que utiliza la lluvia acumulada diaria, el tipo de suelo, el tipo de cobertura de suelo y la topografía como entrada. El modelo SWAT produce resultados anuales y mensuales para infiltración, escurrimiento superficial, flujo base y flujo total de la cuenca (Miller et al., 2002). Utiliza el método del Número de Curva desarrollado por el Soil Conservation Service del Departamento de Agricultura de E.U.A. para estimar el escurrimiento superficial en función de la lluvia, el suelo y el tipo de cobertura del suelo (USDA, 1986).

Datos de lluvia y caudal del río

La lluvia acumulada diaria del año 1970 al año 2000 fue utilizada como entrada al modelo. Estos datos se obtuvieron del sistema ERIC (IMTA, 1999). Los datos

de lluvia corresponden a 10 estaciones climatológicas instaladas en el área de estudio (Figura 4). La lluvia se distribuyó en la cuenca de acuerdo al criterio de Thiessen (Miller et al., 2002). Los registros del caudal del Río San Juan de 1976 a 1996 fueron extraídos del sistema BANDAS (IMTA, 1999).



Figura 4. Localización de las estaciones climatológicas usadas en el estudio, cuadrícula 30x30 km

Datos de suelo

Los mapas de suelo producidos por el INEGI (INEGI, 2000) escala 1:250,000 fueron desarrollados utilizando la clasificación de la FAO (FAO, 1974). 182 diferentes tipos de suelo se encuentran en el área de estudio de acuerdo a la clasificación de la FAO. Estos tipos de suelo fueron reclasificados en cuatro grupos hidrológicos (A, B, C, D) de acuerdo al trabajo de Levick et al. (2002) e INEGI (2000). Debido a la escala del mapa de suelos puede haber un error en el modelo, la magnitud de este error no es cuantificable.

Cobertura de suelo

Existe información de cobertura del suelo para los años 1974 y 1998. La clasificación de la cobertura del suelo en México fue desarrollada considerando la apariencia de la vegetación (Moreno, 2002). La información de la cobertura del suelo fue reclasificada bajo los criterios desarrollados por el SCS (USDA, 1986). Ya que esta clasificación realizada por INEGI en México provee solamente información sobre el tipo de vegetación y no sobre el uso actual del suelo puede haber errores que no se pueden estimar en esta reclasificación. La cobertura del suelo para el año 2020 fue estimada utilizando como base los resultados del Análisis Estratégico del Área Metropolitana de Monterrey (Guajardo, 2003). En este estudio se estima que la población crecerá 30% y el área urbana crecerá 40% del año 2000 al 2020.

Simulaciones utilizando el Modelo SWAT

Antes de calibrar el modelo SWAT primero se determinó el porcentaje de escurrimiento superficial y flujo base del río San Juan utilizando registros de una estación hidrométrica a la salida de la cuenca. Se utilizó un módulo del modelo SWAT para hacer esta separación (Arnold, 1995). Los flujos diarios de 1970 a 1994 fueron utilizados para calcular el flujo base. Después, se realizaron seis corridas del modelo SWAT. La primera fue para calibrar el modelo, la lluvia diaria, el flujo base del río, y la cobertura del suelo para el año 1974 fueron utilizados como entradas del modelo. La calibración se realizó de acuerdo a lo recomendado por los desarrolladores del modelo SWAT, se modificaron algunos parámetros de entrada (Neitsch et al., 2000). La segunda corrida del modelo fue para verificar la calibración del modelo y las coberturas del suelo de los años 1974 y 1998 fueron utilizadas para simular los flujos del río para los años 1976 y 1994 respectivamente. Las corridas 3, 4

y 5 fueron realizadas para evaluar el efecto del cambio de la cobertura del suelo en la hidrología de la cuenca. La lluvia promedio diaria del año 1970 al año 2000 y la cobertura del suelo de los años 1974, 1998 y 2020 fueron utilizadas como entradas para la corridas 3, 4 y 5 del modelo SWAT.

RESULTADOS

Grupos hidrológicos del suelo

La Figura 5 muestra la reclasificación de los tipos de suelo. 54.4% del área de estudio está formada por suelos tipo A, que están formados por gravas y arenas que tienen una alta tasa de infiltración. La mayor parte de los suelos tipo A se encuentran en las zonas montañosas. Los suelos tipo A permiten la infiltración del agua en el suelo de la cuenca. Por lo tanto son muy importantes para el flujo base de los ríos. Los suelos tipo D son compuestos por arcillas de textura fina tienen la menor capacidad de absorber agua y cubren el 24.5% del área de estudio. Se encuentran en zonas con poca pendiente. Los suelos tipo B y C formados por limos cubren el 11.2 y el 9.7% del área de estudio respectivamente.

Cambios en la cobertura del suelo durante el periodo de estudio

La figura 6 muestra los datos de cobertura del suelo de los años 1974, 1998 y 2020. El porcentaje de contribución de cada tipo de cobertura al área total se muestra en la figura 7. Del año 1974 a 1998 hubo un decremento del 5.1% en el matorral desértico en el área de estudio. En el año 1974 sólo 2.2% de la cuenca estaba cubierta por áreas urbanas. Para el año 1998 6.8% de la cuenca eran áreas urbanas y para el 2020 10.9% serán áreas impermeables. Entonces, los cambios más notables en la cobertura es la reducción del matorral desértico y el incremento de las áreas urbanas. El crecimiento del área urbana es mostrado en la Figura 8, donde las áreas amarillas fueron pastizales, matorral desértico o zonas agrícolas en 1998 y para el 2020 muy probablemente sean áreas urbanas. Las áreas verdes fueron matorral desértico en 1998 y se espera que sean bosques en el año 2020. El área convertida en áreas urbanas en el año 2020 es el 18.7 % del área de la subcuenca Áreas Urbanas. Para la subcuenca Cañón del Huajuco el 19.7% de su área será convertida de pastizal o matorral a áreas urbanas para el año 2020.

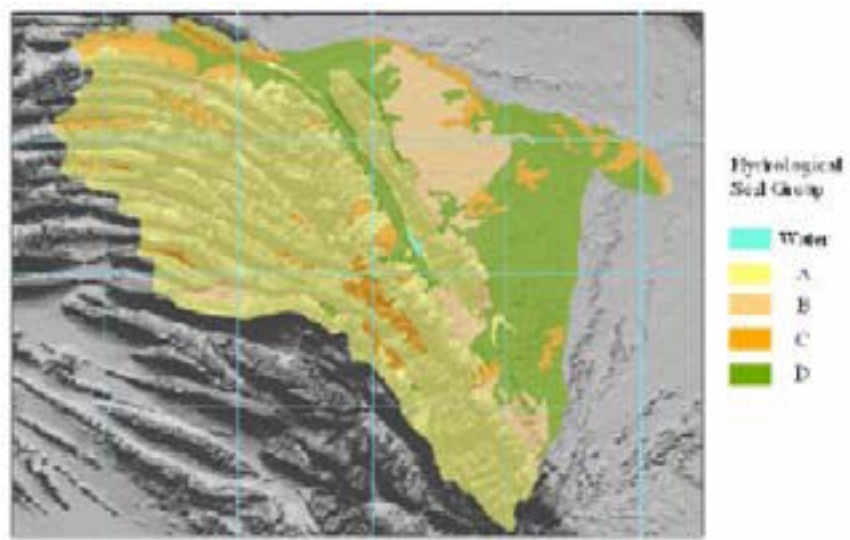


Figura 5. Tipos hidrológicos de suelo en el área de estudio, cuadrícula de 20x20 km

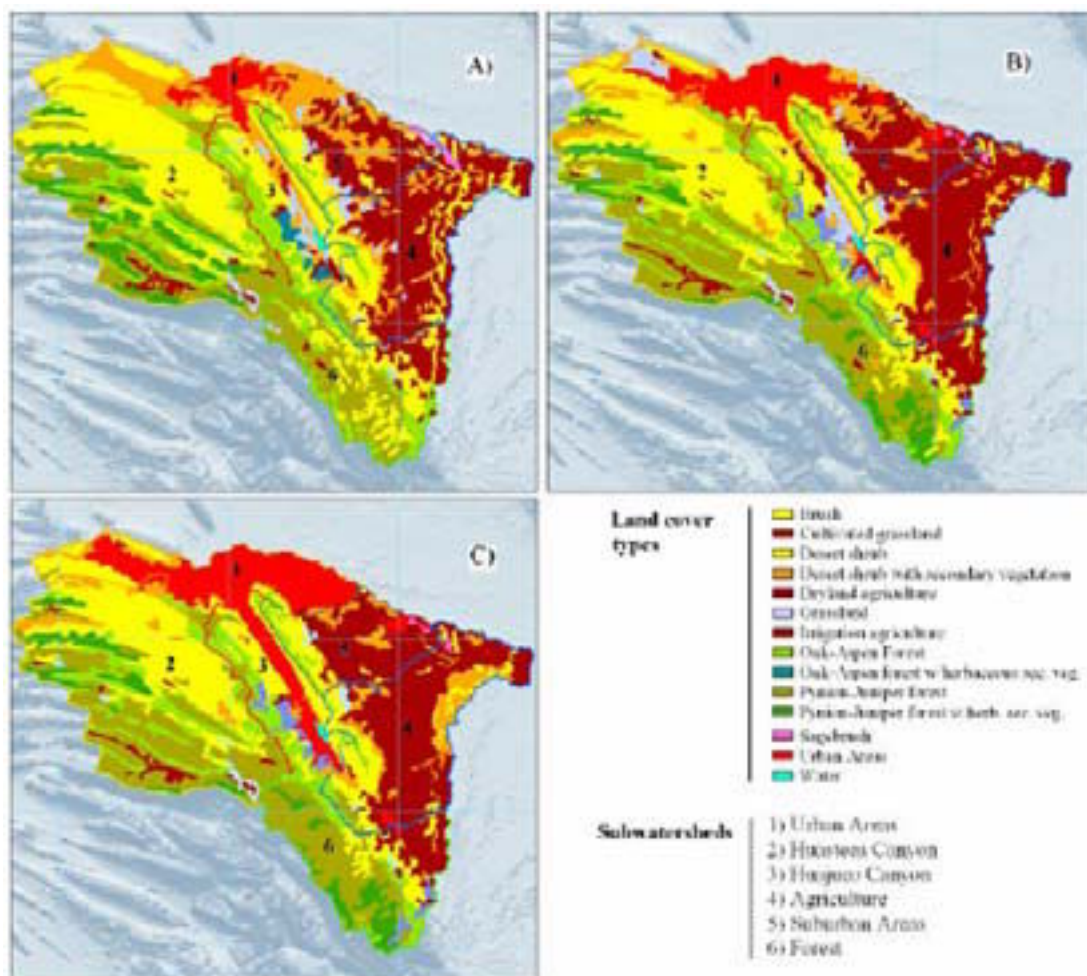


Figura 6. Tipos de cobertura de suelo para los años A) 1974, B) 1998 y C) 2020. Cuadrícula de 25x25 km

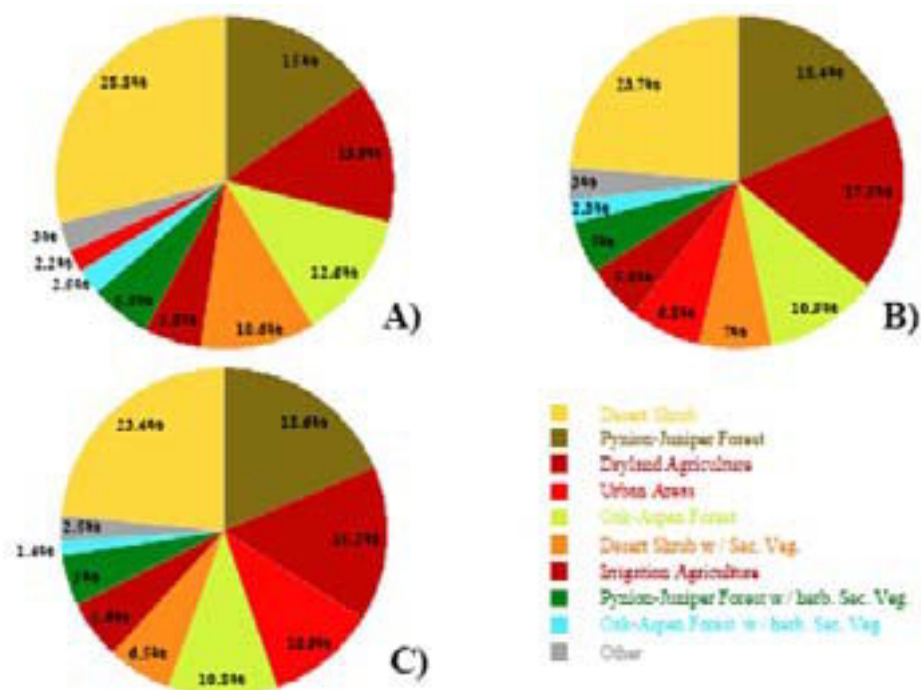


Figura 7. Contribuciones porcentuales de cada tipo de cobertura de suelo al área total de la cuenca para los años A) 1974, B) 1998, y C) 2020

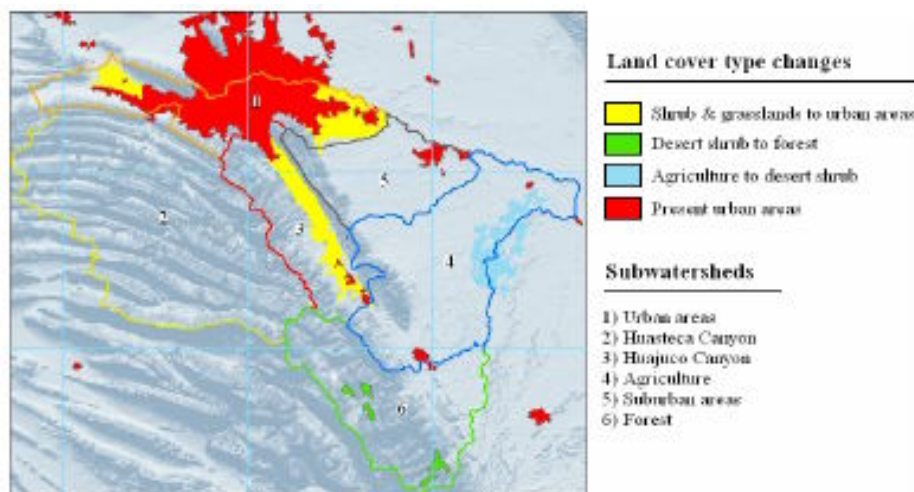


Figura 8. Mayores Cambios en la cobertura del suelo del año 1998 al año 2020

Variación de la lluvia

Los datos de lluvia están disponibles del año 1970 al año 2000 para todas las estaciones climatológicas. La lluvia acumulada mensual de los años cercanos a la producción de los datos de cobertura del suelo usados en el estudio se muestran en la Figura 9. El mes con la precipitación más alta ocurrieron en Septiembre para el año 1974, Julio para 1975, Agosto para 1998 y Octubre para 1999. La precipitación media anual es de 463 mm para el año 1974, 683 mm

para 1975, 489 mm para 1998 y 632 mm para 1999. A causa de las variaciones entre los años, una simulación utilizando los datos de lluvia de 1974 no puede ser comparada con una simulación utilizando los datos de 1998. Para prevenir la interferencia de las variaciones de la lluvia en el efecto del cambio de la cobertura vegetal, la precipitación promedio diaria fue utilizada como entrada para el modelo para las corridas, 3, 4 y 5.

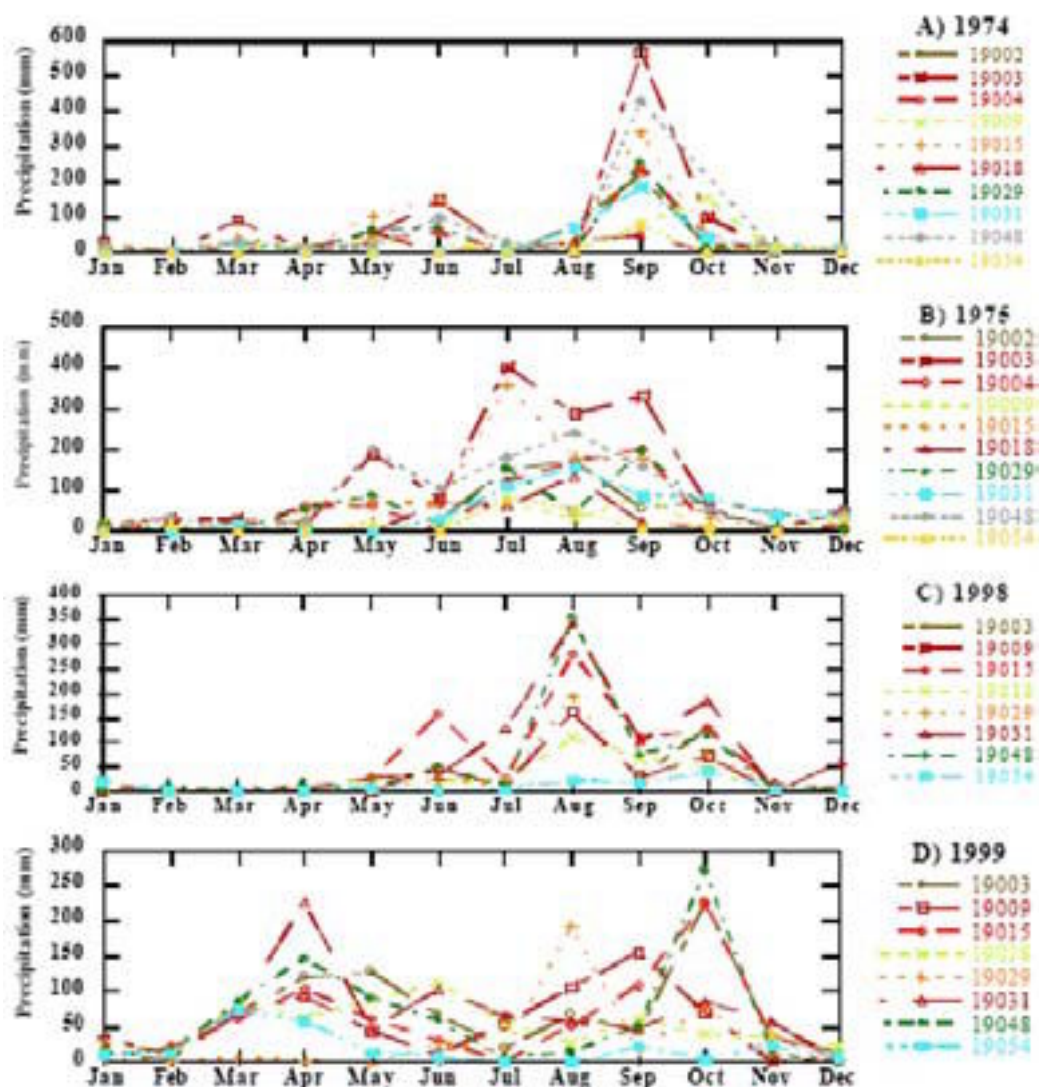


Figura 9. Datos de precipitación mensual colectados en las estaciones climatológicas en el área de estudio para los años A) 1974, B) 1975, C) 1998 y D) 1999

Calibración y verificación del modelo SWAT para el escurrimiento superficial

El flujo base y el escurrimiento superficial estimado utilizando el modelo SWAT fue de 39.5% y 60.5% del total del flujo del río respectivamente. La Figura 10A muestra los resultados de la calibración para el escurrimiento superficial para el año 1974. Los parámetros de entrada que fueron usados en la calibración final del modelo fueron available soil water capacity = 0.28, soil evaporation compensation factor = 0.65, threshold depth of water in shallow aquifer for evaporation to occur = 1020 mm y baseflow recession constant = 0.0313. Las diferencias porcentuales entre los escurrimientos superficiales medidos y los

simulados se muestran en la figura 10A. La diferencia porcentual se encuentra entre -3.9% y 39.3% durante los meses de lluvia (Septiembre, Octubre, Noviembre) y en un rango de -148% a 11.8% durante el resto del año. La diferencia para el acumulado anual es de 1.5%. Los resultados de la verificación del modelo se muestran en la Figura 10B y 10C respectivamente. La diferencia porcentual para el acumulado anual es de 2.1% para el año 1986 y 6.8% para el año 1994. La diferencia porcentual para los acumulados mensuales es 27.8% para el año 1986 y 41.7% para el año 1994 durante los meses de lluvias.

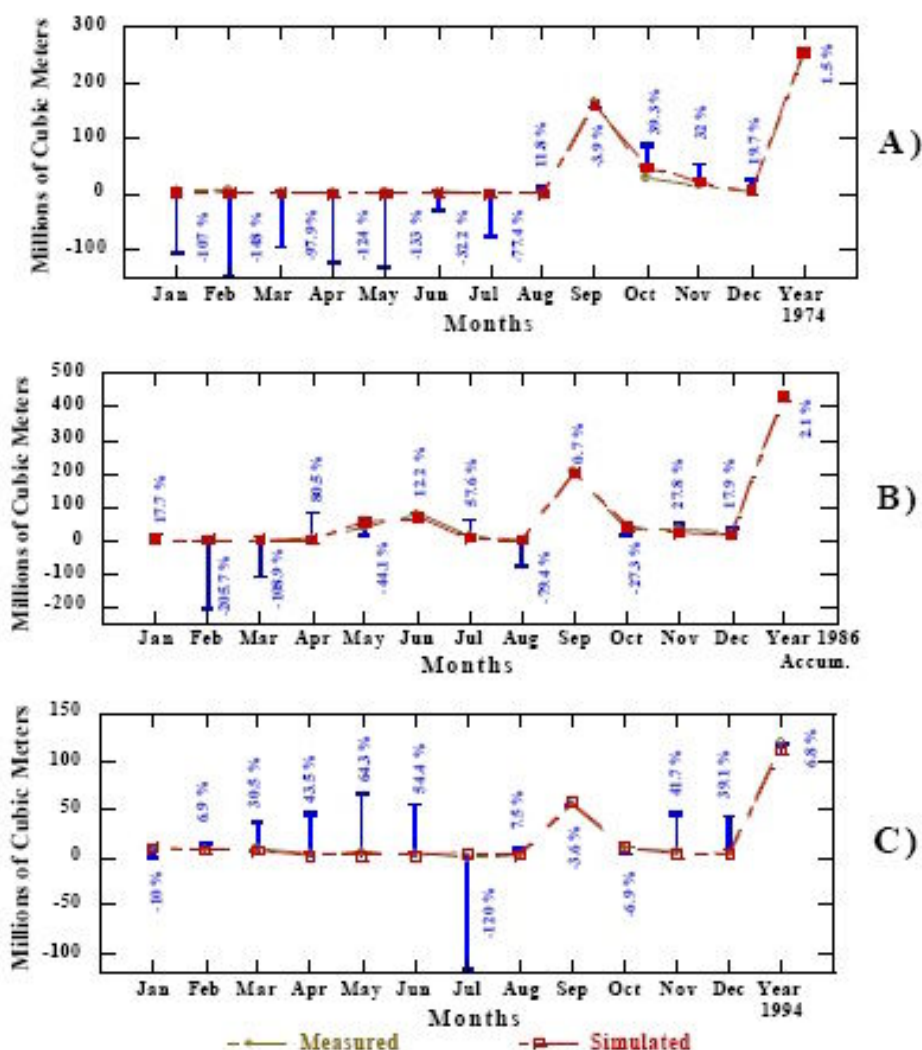


Figura 10. A) Resultados de la calibración del modelo SWAT para los escurrimientos superficiales mensuales para 1974, B) resultados de la verificación del modelo para el escurrimiento mensual superficial para 1986, C) resultados de la verificación del modelo para el escurrimiento mensual superficial para 1994. Las barras azules y los valores indican la diferencia porcentual entre los escurrimientos simulados y medidos.

Escurrimiento simulado promedio anual

La figura 11A muestra el escurrimiento simulado promedio anual para toda el área de estudio. Los cambios en la cobertura del suelo inducen un incremento del 0.7% y del 4.2% en el escurrimiento superficial y un decremento del 5.0% y 6.7% en el flujo base para el año 1998 y el año 2020 comparado a 1974. Sin embargo, el escurrimiento total (la suma del escurrimiento y el flujo base) a la salida de la cuenca disminuye 2.4% y 1.8% en los años 1998 y 2020 respectivamente a pesar de los cambios en la cobertura vegetal en las subcuencas de Áreas Urbanas y Cañón del Huajuco respectivamente. La figura 11B muestra los cambios en el escurrimiento simulado para las seis subcuencas. El mayor

incremento en el escurrimiento superficial entre el año 1974 y el año 2020 se encuentra en las subcuencas Áreas Urbanas y Cañón del Huajuco. Hay que recordar que las superficies impermeables en la subcuenca Áreas Urbanas aumentaron 18.7% de 1974 a 2020. Sin embargo este cambio en la subcuenca Áreas Urbanas causa un incremento del 63.5% en el escurrimiento superficial para el año 2020 en esta subcuenca. Para el Cañón del Huajuco, un incremento del 197% en áreas impermeables causa un incremento del escurrimiento superficial del 17.8% para el año 2020.

Una comparación de los cambios en la infiltración entre las seis subcuencas es mostrada en la Figura 11C. Las mayores caídas se encuentran en el Cañón del Huajuco (10.4%) y Áreas Urbanas (66.4%) para el año 2020. En el caso de la subcuenca Bosque, la infiltración que aumenta 5.2% produce una reducción el escurrimiento superficial del 15.4% para el año 2020. La figura 11D muestra el flujo base simulado

anual. Las mayores diferencias en el flujo base entre el año 1974 y el 2020 se encuentran en las subcuencas Áreas Urbanas (-54.7%). Esto es causado por los pastizales y el matorral desértico que se espera sean convertidos en superficies impermeables en la subcuenca Áreas Urbanas para el 2020 tal y como se mostró en la Figura 8.

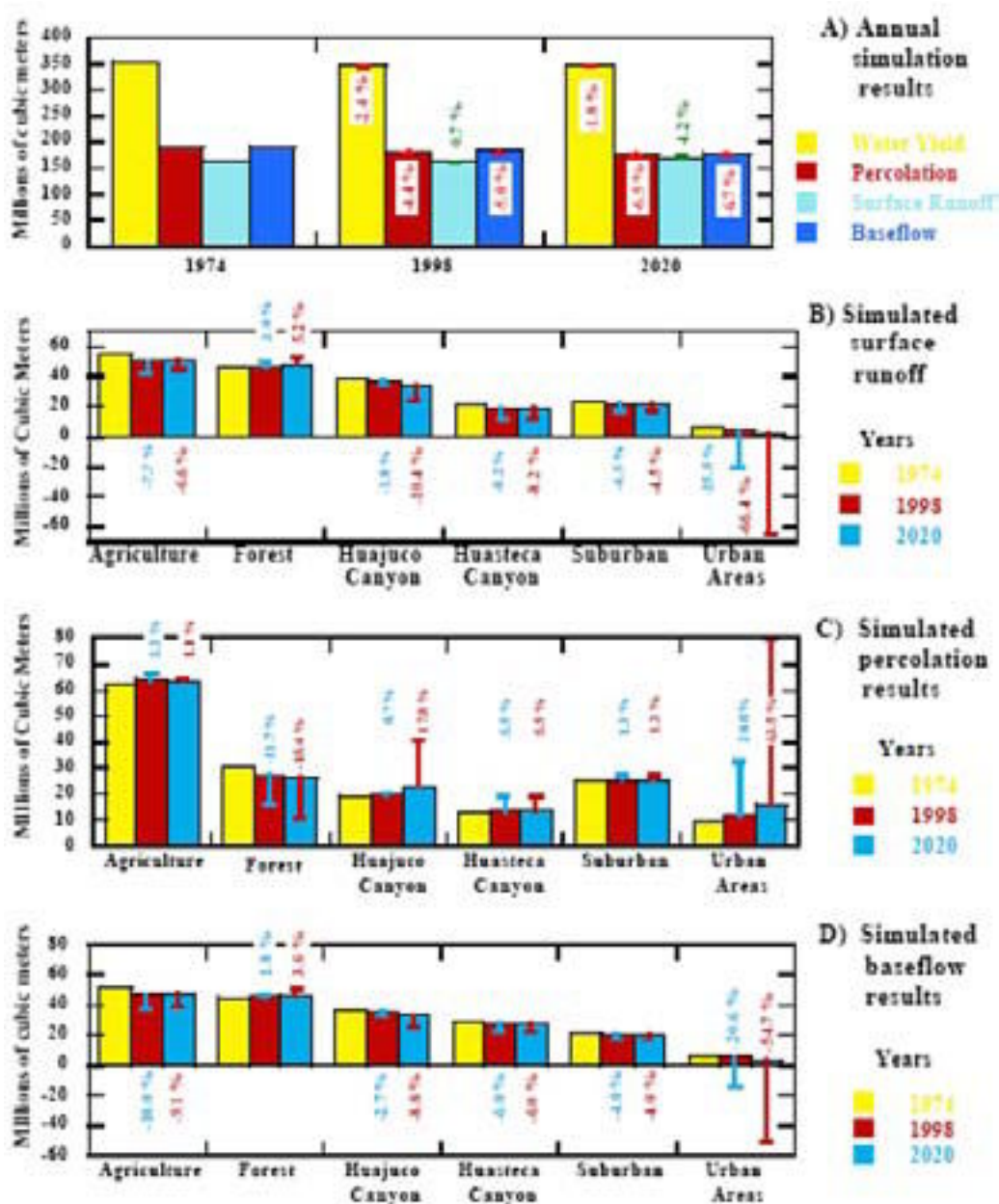


Figura 11. A) Escurrimiento simulado anual y cambios porcentuales en los años 1998 y 2020 comparados con el año 1974 para toda el área de estudio, B) escurrimiento superficial simulado promedio anual y cambios porcentuales para los años 1998 y 2020 comparados con el año 1974 para las seis subcuencas, C) infiltración simulada promedio anual y cambios porcentuales para los años 1998 y 2020 comparados con el año 1974 para las seis subcuencas, D) flujo base simulado promedio anual y cambios porcentuales para los años 1998 y 2020 comparados con el año 1974 para las seis subcuencas

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los datos del tipo de suelo y cobertura de suelo disponibles en México fueron adaptados para que funcionaran como entradas para el modelo SWAT. Los datos de lluvia fueron adecuados a pesar de que faltaban unos cuantos días en los registros del periodo de estudio de 30 años. Los resultados de la calibración del modelo SWAT y su verificación fueron los esperados. Esto permitió que el modelo SWAT fuera utilizado para evaluar el efecto del cambio en la cobertura del suelo en la hidrología del área de estudio. Los resultados de la simulación muestran que el escurrimiento superficial se incrementó considerablemente en las subcuencas Áreas Urbanas y Cañón del Huajuco, como resultado de la transformación esperada de matorral y pastizales en superficies impermeables para el año 2020. El incremento en el escurrimiento superficial en la subcuenca Áreas Urbanas es de 63.5% cuando el área de superficies impermeables aumenta 18.7%. Para la subcuenca Cañón del Huajuco un incremento del 19.7% en las superficies impermeables causa un aumento del 17.8% en el escurrimiento superficial

para el año 2020. Por lo tanto un incremento en el escurrimiento superficial muestra la posibilidad del incremento en la ocurrencia de inundaciones en la estación de lluvias. Los resultados muestran una tendencia hacia la reducción del flujo base en el Cañón del Huajuco y las Áreas Urbanas. Este decremento significa una reducción en el caudal de las corrientes superficiales perennes que puede derivar en escasez local de agua superficial. A pesar de todos los cambios en la cobertura del suelo el escurrimiento total del área de estudio permanece casi sin variación, un decremento del 2.4% para el año 1998 y 1.8% para el año 2020. Estas diferencias tan pequeñas se deben a que los cambios en la cobertura del suelo han ocurrido en dos subcuencas que sólo cubren 23.5% del área total de estudio. La cobertura de suelo sin alterar en las subcuencas Cañón de la Huasteca y Bosque sirven de "buffer" que absorben los impactos de la urbanización en otras subcuencas. Particularmente, los tipos de suelo A en el Cañón de la Huasteca y Bosque permiten una fácil infiltración del agua en el suelo independiente de cambios en la cobertura vegetal del suelo.

BIBLIOGRAFÍA

- Arnold Jeff. 2000. SWAT, Soil and Water Assessment Tool Software. Temple, TX. USDA Agricultural Research Service.
- Comisión Nacional del Agua. 2005 Síntesis de Estadísticas del Agua en México Mexico D.F.
- Cotler Helena, Bocco Gerardo. 2004. Manejo Integral de Cuencas en Mexico. Mexico D.F., Instituto Nacional de Ecología, pp. 11, 41.
- Descheemaeker, K., J. Nyssen, J. Poesen, D. Raes, M. Haile, B. Muys, S. Deckers. 2006. Runoff on slopes with restoring vegetation: A case study from the Tigray highlands, Etiopia. *Journal of Hydrology*. Volume 331, Issues 1,2, pp. 219-241.
- FAO, United Nations Food and Agriculture Organization. 1974. Legend of the soil map of the world. Paris, France. UNESCO.
- Guajardo, A. A. 2003. Crecimiento urbano en Monterrey, Análisis estratégico del area metropolitana de Monterrey. Monterrey, Mexico. ITESM.
- Heil Costa, M., A. Botta, J. A. Cardillo. 2003. Effects of large scale changes in land cover on the discharge of Tocantins River, Southwestern Amazonia. *Journal of Hydrology*, Volume 283, Issues 1-4, pp. 206-217.
- IMTA, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 1999. Extractor Rápido de Información Climatológica, ERIC II, Cuernavaca, Mexico. IMTA.
- IMTA a, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua 1999. Banco nacional de datos de aguas superficiales, BANDAS, Cuernavaca, Mexico. IMTA.
- INEGI , Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 1990. Guía para la interpretación cartográfica, climatología
- INEGI , 2000. Mapa de edafología, escala 1:250,000
- Kostadinov Stadimir, S.Vucicevic, S. Markovic, M. Nikolic. 1998. Runoff regime in small watersheds with different degrees of forest cover. Fourth International Conference on Headwater Control, Merano, Italy. A. A. Balkema Editor.
- Levick, L. R., D. J. Semmens, D. P. Guertin, I. S. Burns. S. N. Scott. C. L. Unkrich, D. C. Goodrich. 2002. Adding global soils data to the Automated Geospatial Watershed Assessment Tool. Temple, AZ. USDA -ARS Southwest Watershed Research Center.
- Miller, S.N., D.J. Semmens, R.C. Miller, M. Hernandez, D.C. Goodrich, W.P. Miller. W.G. Kepner, D.W. Ebert. 2002. GIS-Based Hydrologic Modeling: The Automated Geospatial Water Assessment Tool, Documentation and user manual. Tucson, AZ.
- Moreno Jose Alberto. 2002. Mapa de uso de suelo y vegetación para los años 1974 y 1998, escala 1,250:000, Mexico D.F. INEGI / SEMARNAT.
- Neitsch S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, R. Srinivasan, J.R. Williams. 2000. Soil and Water Assessment Tool User's Manual. Chapter 13, pp. 125 SWAT input data: .WGN. Temple, TX. Blackland Research Center.
- Singh Vijay P. 1992. Elementary hydrology. Englewood Cliffs, NJ. Prentice Hall
- Taniguchi, M. 1997. Subsurface water responses to land cover/use changes, and overview. Boston, MA. Kluwer Academic Publishers.
- USDA, United States Department of Agriculture. 1986. Technical Release 55 – Urban hydrology for small watersheds. Washington, DC. Natural Resources Conservation Service – Conservation Engineering Division.
- Williamson D.R., R.A. Stokes, J.K. Ruprecht. 1987. Response of input and output of water and chloride to clearing for agriculture. *Journal of Hydrology*. Volume 94. Issues 1-2. pp. 1-28

Análise dos fatores que controlam a distribuição espacial da turbidez no reservatório de Itupararanga – SP

Letícia Sabo Boschi¹; Maria de Lourdes Bueno Trindade Galo¹; Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo²

¹ Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas – FCT/Unesp
leticiasabo@yahoo.com.br; mlourdes@fct.unesp.br

² Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto – INPE - evlyn@ltid.inpe.br

RESUMO

A turbidez mede a atenuação da luz causada pela presença de matérias sólidas em suspensão, matéria orgânica e inorgânica, organismos microscópicos e algas na coluna d'água. Esses materiais podem originar-se do solo (quando não há mata ciliar); da mineração; das indústrias ou do esgoto doméstico sem tratamento (UFRRJ, 2007) e da re-suspensão de sedimentos de fundo pela ação de ventos. Levando-se em conta esses fatores controladores, testou-se a hipótese de que a distribuição espacial da turbidez no reservatório de Itupararanga-SP é determinada pela distância entre uma dada classe de turbidez e a fonte do material que lhe dá origem. Para isso, confeccionou-se um mapa de potencial do solo à erosão, cruzando os mapas de declividade, tipos de solos e cobertura do solo; um mapa de turbidez e um mapa de distâncias entre as classes de turbidez e as classes de potencial de erosão do solo. A análise dos resultados mostrou que não é possível inferir a distribuição espacial da turbidez com base somente na distância das classes de turbidez às classes de potencial à erosão, pois os mapas mostram que as classes de maior turbidez não se apresentaram próximas às classes de alto potencial do solo à erosão, mas sim, próximas às classes de floresta do mapa de cobertura do solo, mesmo possuindo potencial de erosão de baixo a médio. Isso significa que outros fatores hidrodinâmicos e não apenas a proximidade devem controlar a turbidez, tais como profundidade do reservatório, dimensão e forma do corpo d'água em relação às direções dominantes de vento, entre outros fatores.

Enquanto, a erosão é um processo que ocorre ao longo do tempo em determinadas estações do ano, a turbidez pode ser um fenômeno passageiro decorrente de um pulso de sedimentos ou da ação esporádica do vento. Esses aspectos deverão ser analisados em trabalhos futuros.

Palavras-chave: Fatores controladores da distribuição espacial da turbidez, potencial de erosão do solo, geoprocessamento.

ABSTRACT

Turbidity measures the attenuation of light caused by

the presence of suspended solids, organic and inorganic matter, microscopic organisms and algae in the water column. These materials may originate from the soil – when there is no riparian vegetation –, mining, industries, domestic sewage without treatment (UFRRJ, 2007), and the resuspension of bottom sediments caused by wind action. Taking these controlling factors into account, we tested the hypothesis that the spatial distribution of turbidity in the reservoir Itupararanga-SP is determined by the distance between a given class of turbidity and the source of the material that gives rise to it. To do so, we draw up a map of potential soil erosion – by crossing the maps of slope, soil types, and land cover – a turbidity map and a map of distances between classes of turbidity and classes of potential soil erosion. The analysis of the results showed that it is not possible to infer the spatial distribution of turbidity based only on the distance between the classes of turbidity and the classes of potential erosion, for the maps show that the classes of higher turbidity do not come close to the classes of high soil erosion potential, but to the classes of forest of the land cover map despite having low to medium erosion potential. This means that other hydrodynamic factors – not just the proximity – must control the turbidity, such as reservoir depth, size and shape of the water body in relation to the dominant directions of wind, among other factors. While erosion is a process that occurs over time in certain seasons, the turbidity may be a temporary phenomenon resulting from a pulse of sediment or from the sporadic action of the wind. These aspects should be analyzed in future work.

Keywords: Factors controlling the spatial distribution of turbidity, potential soil erosion, geoprocessing.

INTRODUÇÃO

O barramento de um rio, com a finalidade de gerar energia elétrica, irrigação, abastecimento d'água e outros fins, é denominado reservatório. Contudo, não somente aspectos benéficos devem ser considerados, uma vez que a construção de barragens afeta o ambiente previamente existente, alterando o funcionamento natural dos sistemas hidrológico, biológico, geológico e climático (VIEIRA et. al, 2002).

A qualidade ambiental dos reservatórios está intrinsecamente associada às condições de qualidade de água de seus rios contribuintes, à ocupação e uso do solo no entorno do reservatório, aos tipos de solos, à declividade, às atividades econômicas implantadas e às condições sanitárias do entorno e do tempo de residência de suas águas.

De acordo com Mota (1995), os programas mais recentes de gestão dos recursos hídricos têm dado maior destaque às medidas preventivas de controle, pois são mais eficientes e menos onerosas, evitando-se prejuízos econômicos e sociais devido à poluição. Logo, o planejamento adequado do uso e ocupação do solo tem sido uma melhor forma de prevenir a poluição ambiental. Nesse contexto, o planejamento e gestão dos recursos hídricos dependem fundamentalmente de informações confiáveis que são indispensáveis para um adequado gerenciamento dentro de bases sustentáveis.

O Brasil é um país com poucos sistemas de monitoramento de qualidade da água e que, dispõe de uma quantidade reduzida de informações sobre o estado de seus corpos da água, principalmente em relação às suas dimensões territoriais, diferenças geográficas regionais e magnitude dos problemas de poluição. Este fato, mostra a necessidade do país desenvolver sua tecnologia de redes de monitoramento de qualidade da água e reconhecer a importância de investir no melhoramento e ampliação de seus bancos de informações no setor de recursos hídricos (REBOUÇAS, 2002).

As atividades de monitoramento e avaliação da qualidade de superfícies aquáticas podem ser realizadas utilizando-se tecnologias ou técnicas, como o uso de sensoriamento remoto e análise de imagens de satélites. Se por um lado, existe uma limitação técnica dos dados multiespectrais adquiridos sistematicamente, a partir de plataformas orbitais para aplicações com água, a dimensão do espelho d'água de muitos reservatórios brasileiros pode inviabilizar programas de monitoramento da qualidade da água, face ao alto custo da implementação de um esquema de amostragem adequado. Devido ao seu caráter sinóptico e repetitivo, as imagens de satélite podem se constituir em um recurso auxiliar valioso no processo de alocar adequadamente pontos de amostragem no reservatório e mesmo de mapear a distribuição espacial de alguns componentes presentes no corpo d'água, correlacionados com sua variabilidade espectral, como é o caso da turbidez.

O aumento de turbidez nos períodos de maior precipitação pode ocorrer em função do grande aporte de material que é carregado pelas chuvas para o corpo d'água em questão, e pela mistura na água causada pelo vento, ocasionando uma re-suspensão de nutrientes dos sedimentos, em regiões menos profundas (ROCHA, 2003).

Nesse contexto, o objetivo geral desse trabalho é analisar os fatores que influenciam a distribuição espacial da turbidez da água do reservatório de Itupararanga e a hipótese a ser investigada é a de que

a distribuição espacial da turbidez no reservatório é determinada pela distância das classes de turbidez às classes de tendência de carreamento de sedimentos. Para testar essa hipótese foram formulados os seguintes objetivos específicos: produzir um mapa de potencial do solo à erosão, a partir do cruzamento dos mapas de declividade, tipos de solos e cobertura do solo; produzir um mapa de classes de turbidez a partir de medidas "in situ" coletadas em 200 estações amostrais do reservatório e produzir um mapa de distâncias entre as classes de turbidez e as classes de potencial do solo à erosão.

TURBIDEZ COMO INDICADOR DA QUALIDADE DA ÁGUA

As águas pluviais ao escoarem pelo solo podem carregar impurezas para os corpos d'água que vão depender de vários fatores: uso do solo na área, fatores hidrológicos, cobertura do solo, entre outros. O processo erosivo no solo pode resultar no transporte de partículas para os corpos d'água, contribuindo para modificações na qualidade, e principalmente a elevação da turbidez (MOTA, 1995). A turbidez representa o grau de interferência com a passagem da luz através da água, conferindo uma aparência turva à mesma, causada pela presença de matérias sólidas em suspensão (silte, argila, sílica, colóides), matéria orgânica e inorgânica finamente divididas, organismos microscópicos e algas. A origem desses materiais pode ser o solo (quando não há mata ciliar); a mineração (como a retirada de areia ou a exploração de argila); as indústrias; ou o esgoto doméstico, lançado no manancial sem tratamento (UFRRJ, 2007).

Há distinção entre a matéria suspensa ou sedimento, que precipita rapidamente, daquela que se precipita vagarosamente e que provoca a turbidez. A turbidez é encontrada em quase todas as águas de superfície, mas está normalmente ausente nas águas subterrâneas.

As águas de lagos, lagoas, açudes e represas apresentam, em geral, baixa turbidez, porém variável em função dos ventos e das ondas que, nas rasas, podem revolver os sedimentos do fundo. Via de regra, após uma chuva forte, as águas dos mananciais de superfície ficam turvas, graças ao carreamento dos sedimentos das margens pela enxurrada. Assim, os solos argilosos e as águas em movimentação, ocasionam turbidez.

A turbidez, além de reduzir a penetração da luz solar na coluna d'água, prejudicando a fotossíntese das algas e plantas aquáticas submersas, pode recobrir os ovos dos peixes e os invertebrados bênticos. Os sedimentos em suspensão podem carrear nutrientes e pesticidas, obstruindo as guelras dos peixes e até interferir na habilidade do peixe em se alimentar e se defender dos seus predadores. As partículas em suspensão localizadas próximo à superfície podem absorver calor adicional da luz solar, aumentando a temperatura da camada superficial da água (UFRRJ, 2007).

Os padrões de qualidade da água referem-se a um certo número de parâmetros capazes de refletir a presença efetiva ou em potencial de algumas substâncias ou microorganismos que possam comprometer a sua qualidade estética ou sanitária (REBOUÇAS, 2002).

Para uma melhor representação das classes de turbidez é melhor determiná-las baseadas em algum padrão estabelecido. Por isso, de acordo com a Resolução no 20, de 18 de junho de 1986 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) o Reservatório de Itupararanga pertence à classe 2 (BRASIL, 2006). O CONAMA estabelece ainda que a turbidez permitida na classificação das águas vai até 100 UNT (Unidades Nefelométricas de Turbidez).

METODOLOGIA

A área de estudos do presente trabalho refere-se à área de influência do reservatório de Itupararanga, Estado de São Paulo, cuja delimitação foi feita com base na identificação das áreas que drenam em direção ao reservatório (bacia hidrográfica da represa de Itupararanga). Desta maneira, não foi considerada toda bacia do rio Sorocaba, principal formador do reservatório de Itupararanga (QUEIROZ, 2006).

Dados de entrada

- Mapa de cobertura do solo do reservatório de

Itupararanga, produzido por Queiroz (2006) e realizado a partir de imagens obtidas pelo sensor CCD do satélite Cbers (bandas 2, 3 e 4), disponibilizadas gratuitamente pelo INPE – Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE, 2006), referente à coordenada órbita/ponto 155/126, com resolução espacial de 20 metros, obtidas em 21 de janeiro de 2006;

- Mapa esquemático de solos produzido pelo Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Sorocaba e Médio Tietê – CBH, na escala 1:250000, em formato .pdf;
- Curvas de nível vetorizadas de cartas topográficas na escala 1:50000 de Sorocaba e São Roque, que abrangem a bacia do reservatório de Itupararanga;
- Dados de Turbidez, coletados em 21 de julho de 2006, pelos pesquisadores da FCA (Faculdade de Ciências Agrárias)/ Unesp de Botucatu, engenheiros agrônomos Drs. Eduardo Negrisoli e Marcelo Rocha Corrêa. Nesse levantamento no reservatório de Itupararanga, foram coletados 200 elementos amostrais posicionados com GPS de navegação. Estes pontos de coleta foram distribuídos por todo o reservatório e caracterizados quanto à Turbidez da água.

Definição das classes de turbidez

A Figura 1 a seguir, apresenta a distribuição dos 200 pontos amostrais referentes à turbidez, coletados por todo o reservatório, em 21 de julho de 2006.

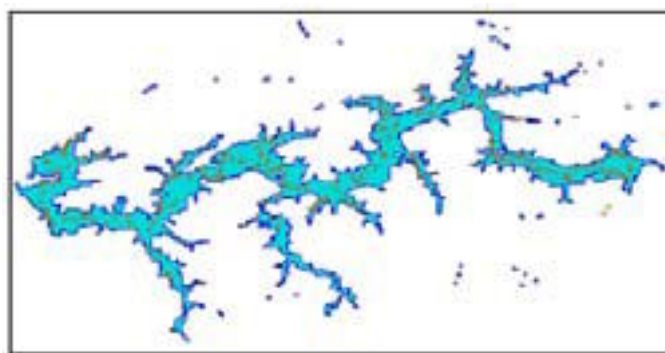


Figura 1 – Distribuição dos pontos amostrais ao longo do reservatório de Itupararanga

A partir dos pontos de turbidez, foi gerada uma grade triangular (TIN) e na sequência, uma grade retangular. A partir dessa foi realizado o fatiamento, produzindo assim, o mapa de classes de turbidez (Figura 2), o qual foi recortado a partir do limite do reservatório.

Os intervalos utilizados para definir as classes de turbidez foram definidos por Saito (2007) e são apresentados na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Classes de turbidez usando intervalos definidos por Saito (2007)

Nome da classe	Intervalo dos valores de Turbidez (FTU*)
Menor	1 a 10
Intermediária	10 a 25
Maior	Maior que 25

*FTU equivale a NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez).

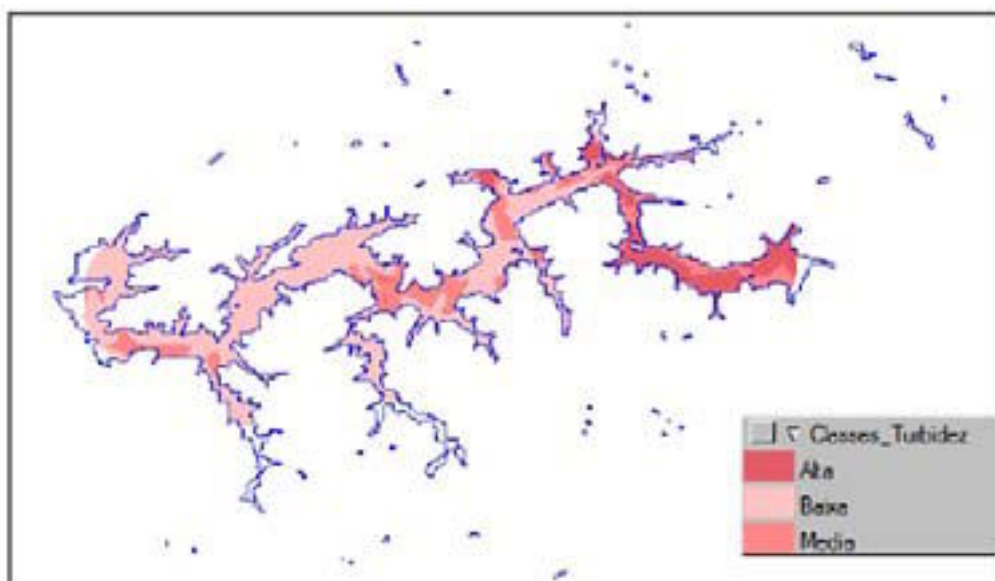


Figura 2 – Mapa de classes de turbidez usando intervalos definidos por Saito (2007)

Justifica-se o uso dos intervalos definidos por Saito (2007) ao invés dos intervalos baseados no padrão estabelecido pelo CONAMA (Tabela 2), pelo fato

desses não terem sido representativos, pois o reservatório de Itupararanga não apresenta valores de alta turbidez (acima de 100 FTU).

Tabela 2 – Classes de Turbidez usando intervalos do CONAMA

Nome da classe	Intervalo dos valores de Turbidez (FTU*)
Baixa	0 a 40
Média	40 a 100
Alta	100

Geração do mapa de Declividade

A partir da importação das curvas de nível foi possível gerar a grade triangular (TIN), utilizando como linhas de quebra os afluentes do reservatório e em seguida gerar a grade retangular, a qual foi utilizada na

seqüência para gerar a declividade. Realizando o fatiamento da declividade produziu-se o mapa de classes de declividade (Figura 3), o qual foi recortado a partir do limite da bacia do reservatório de Itupararanga.

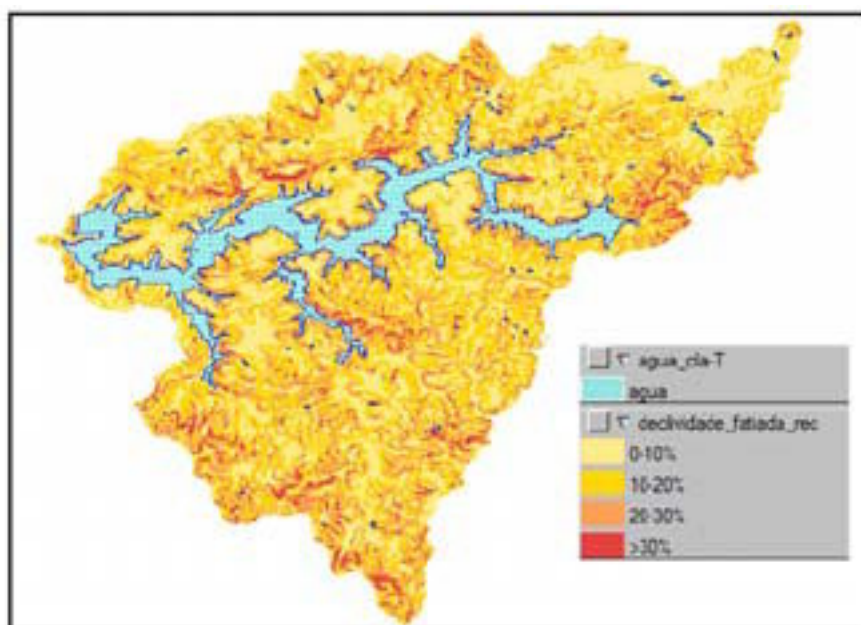


Figura 3 – Mapa de classes de declividade da bacia do reservatório de Itupararanga

Analisando a Figura 3 verifica-se que a bacia do reservatório de Itupararanga não apresenta muitas áreas com alta declividade. Portanto, pode-se inferir que a área de estudos é uma região predominantemente plana.

Geração do mapa de solos

Vetorizando o mapa esquemático de solos (escala 1:250000) gerou-se um mapa de tipos de solos referente somente à bacia do reservatório de Itupararanga (Figura 4).

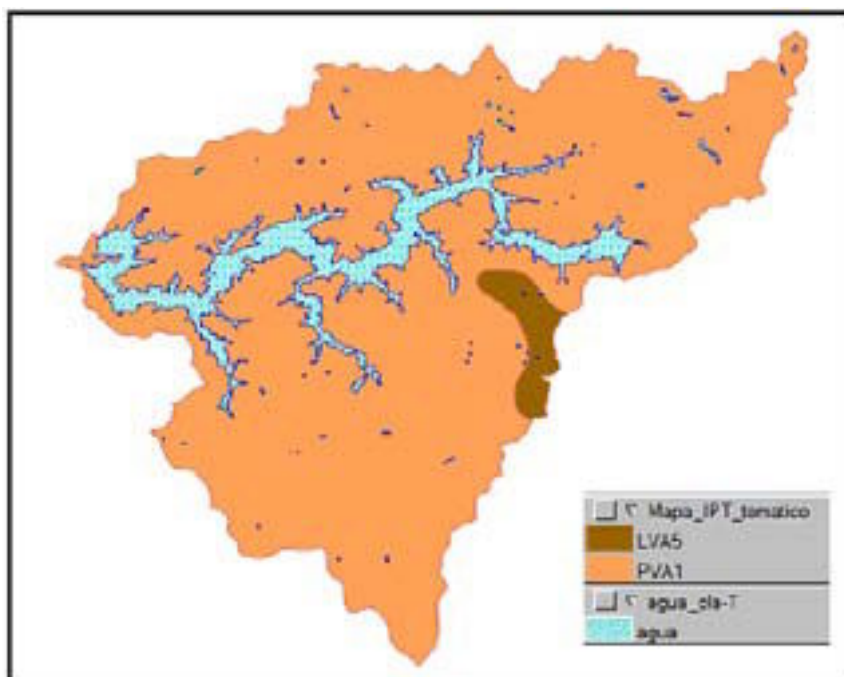


Figura 4 – Mapa de tipos de solos da bacia do reservatório de Itupararanga

Pelo fato do mapa de tipos de solo da bacia do reservatório de Itupararanga ser oriundo de um mapa produzido na escala 1:25000, foram encontrados somente dois tipos de solo na bacia do reservatório de Itupararanga, são eles: predomínio de Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos (solo não ácido), texturas média/argilosa e argilosa, A moderado (PVA-1) e Predomínio de Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos, textura argilosa A moderado (LVA-5).

Mapa de potencial do solo à erosão

A fim de produzir um mapa que indicasse as classes

de potencial do solo à erosão foi realizada uma operação booleana utilizando a linguagem LEGAL (Software Spring), na qual foram cruzados os mapas produzidos (mapa de tipos de solos da bacia do reservatório e mapa de declividade da bacia do reservatório) e o mapa de cobertura do solo (Figura 5), produzido por Queiroz (2006). Gerando assim, o mapa de potencial do solo à erosão (Figura 6).

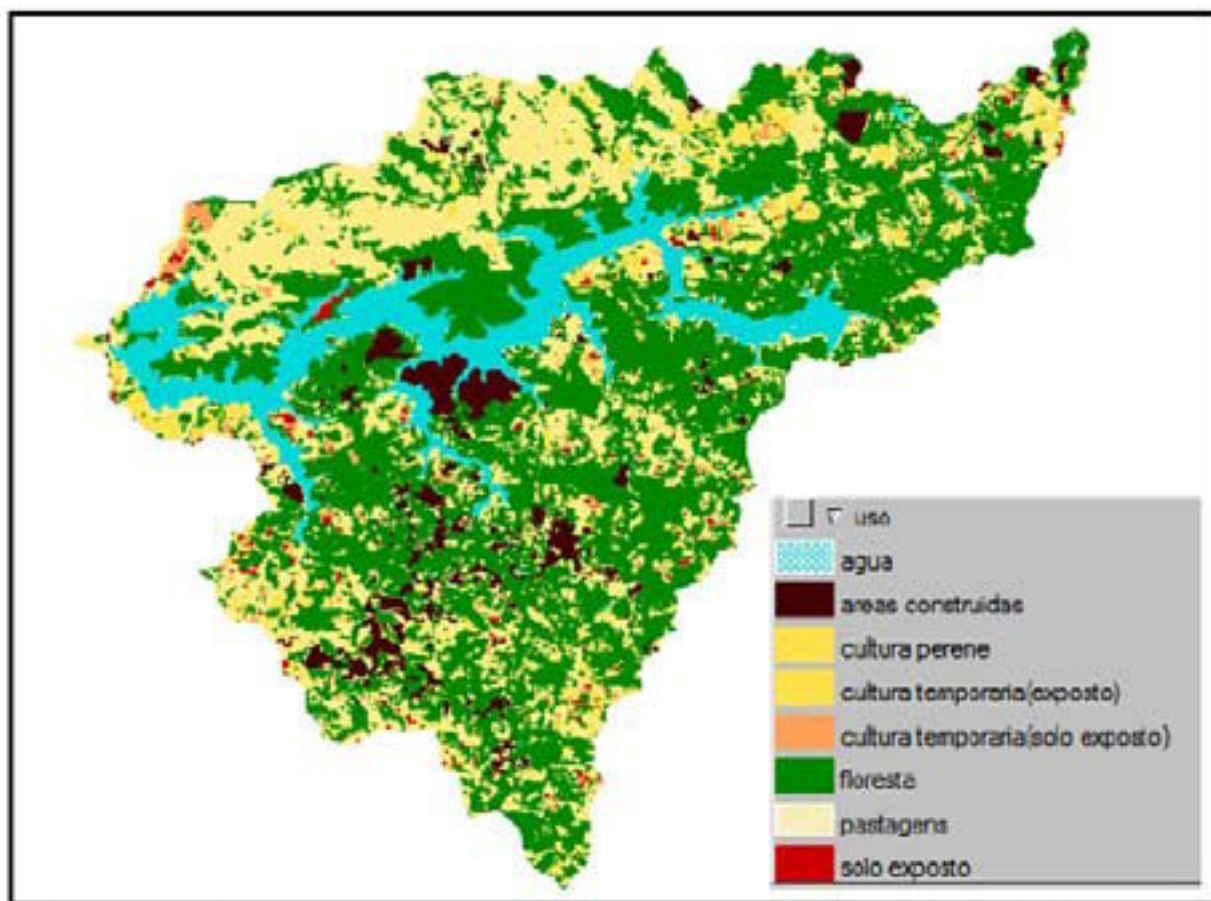


Figura 5 – Mapa de cobertura do solo da bacia do reservatório de Itupararanga

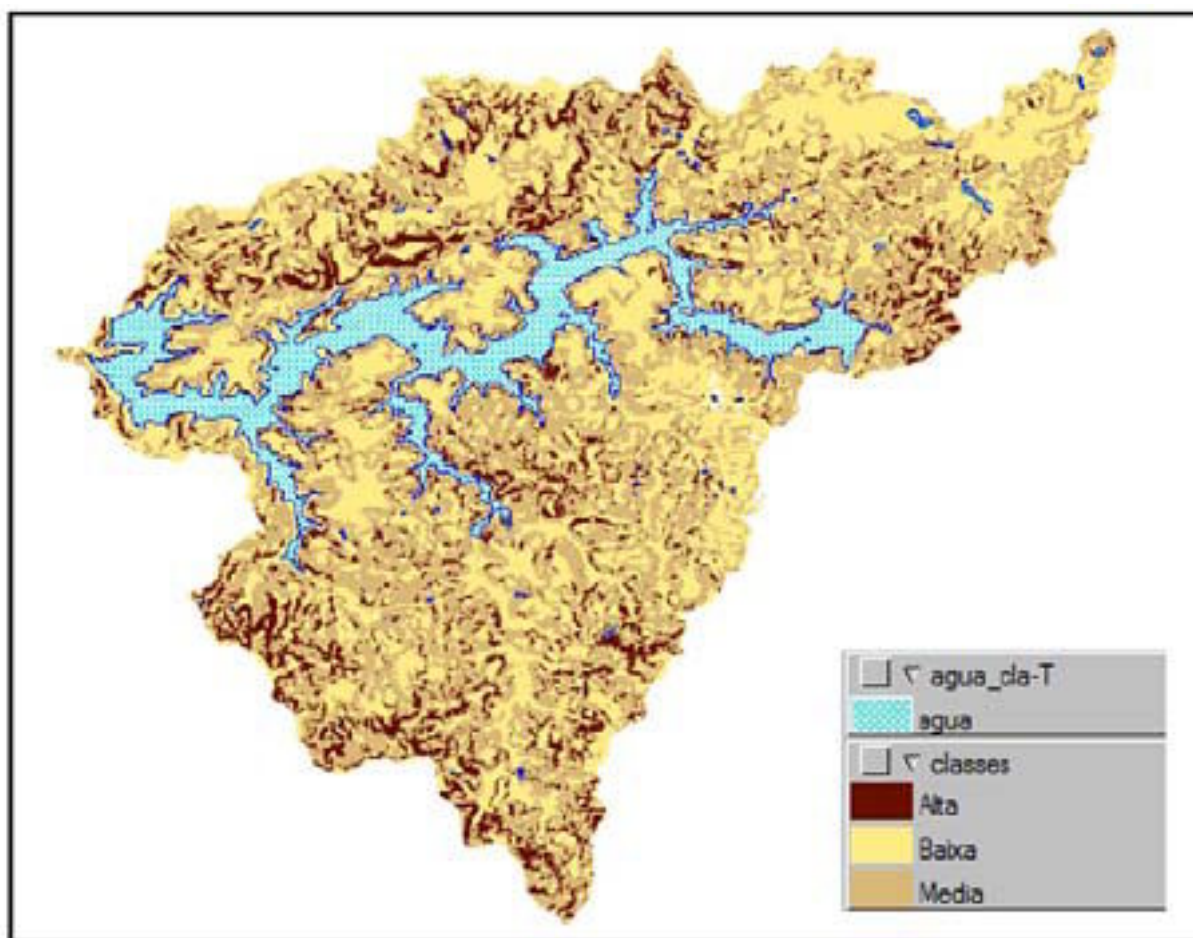


Figura 6 – Mapa de potencial do solo do reservatório de Itupararanga à erosão

Comparando o mapa de potencial do solo à erosão (Figura 6) com o mapa de classes de declividade (Figura 3) é possível verificar que no mapa de potencial à erosão, a variável que teve maior participação foi a declividade. Isso é justificável pelo fato do mapa de solos apresentar somente dois tipos de solo e pelo fato da cobertura do solo ser

predominantemente dos tipos: floresta, pastagem e culturas. O que faz com que não haja grandes variações, inferindo a essa variável uma participação não muito significativa. A Figura 7 a seguir apresenta uma comparação entre os dois mapas.

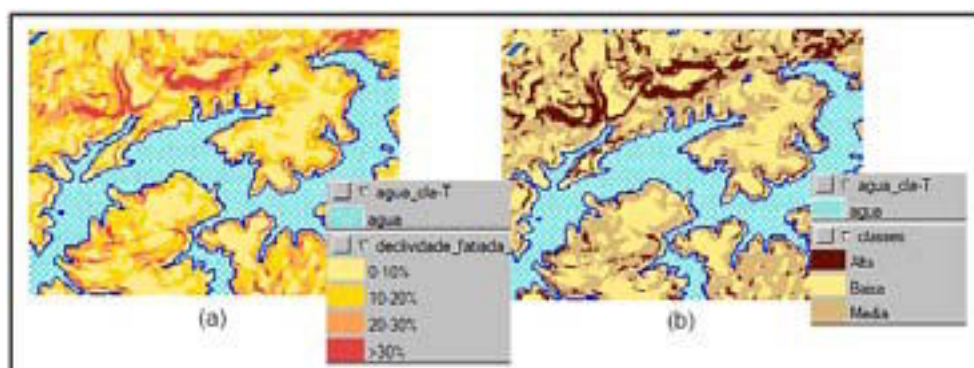


Figura 7 – Comparação entre o mapa de classes de declividade (a) e o mapa de potencial do solo à erosão (b)

Mapa de distâncias

Para testar a hipótese de que a distribuição espacial da turbidez no reservatório é resultado do aporte de sedimentos e de que essa distribuição é determinada pela distância das classes de turbidez às classes de potencial de transporte de sedimentos, foram gerados os mapas de distâncias referentes a cada uma das classes de potencial à erosão.

Um mapa de distância é um tipo de análise de proximidade que apresenta zonas com larguras especificadas (distâncias) em torno de um ou mais elementos do mapa. Para gerar tal mapa, utilizou-se o mapa temático de potencial do solo à erosão, do qual

foram selecionadas as classes individualmente e então gerados os mapas de distância entre a classe de alto potencial à erosão, às classes de turbidez e assim sucessivamente.

Como resultado desses mapas de distâncias, obtiveram-se grades numéricas, as quais em seguida foram fatiadas nas classes denominadas: próxima, intermediária e distante das áreas de potencial do solo à erosão. Os intervalos referentes a cada uma das classes definidas é apresentado na Tabela 3 a seguir e os mapas temáticos representando os mapas de distância são mostrados nas Figuras 8, 9 e 10.

Tabela 3 – Intervalos das classes de distância às classes de turbidez

Nome da classe	Intervalo das classes de distância
Próxima	0 a 30
Intermediária	30 a 150
Distante	maior que 150

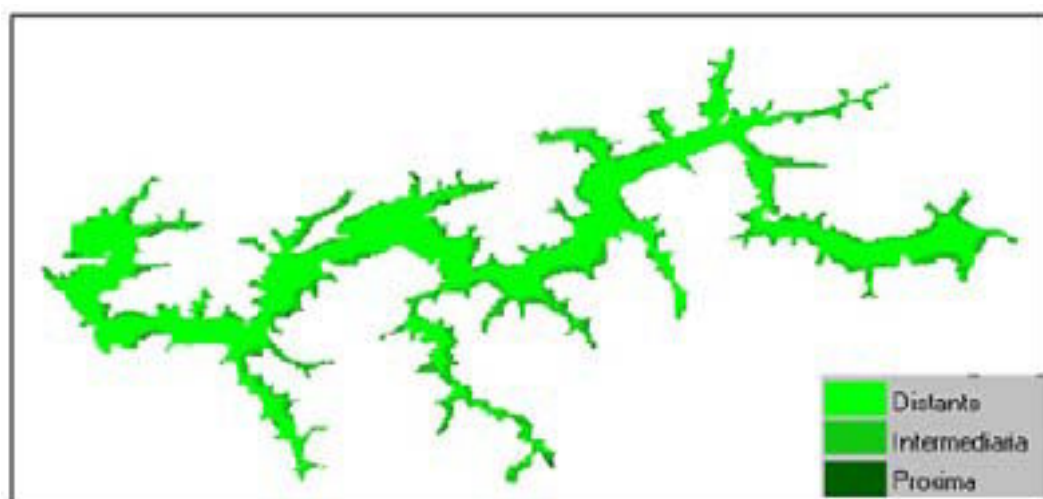


Figura 8 – Mapa de distância entre as classes de turbidez e a classe de alto potencial à erosão

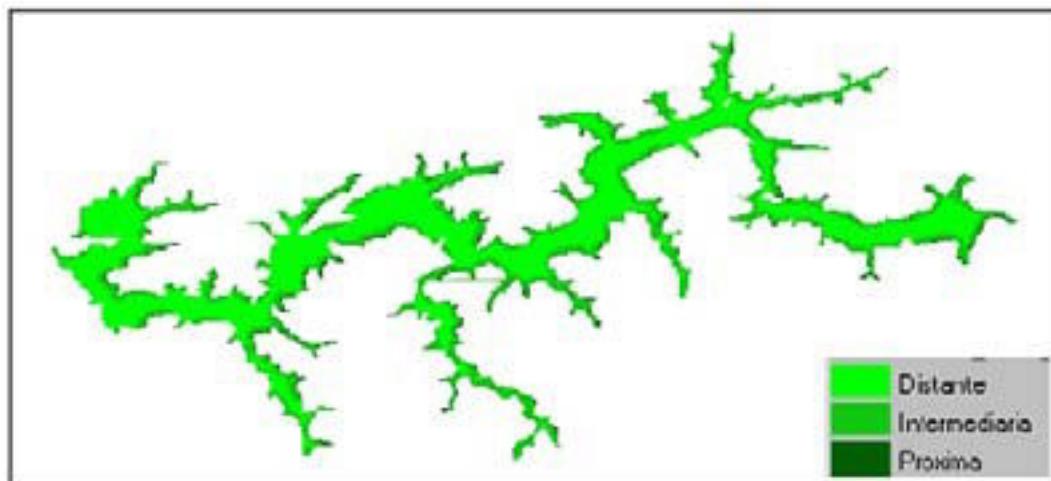


Figura 9– Mapa de distância entre as classes de turbidez e a classe de médio potencial à erosão

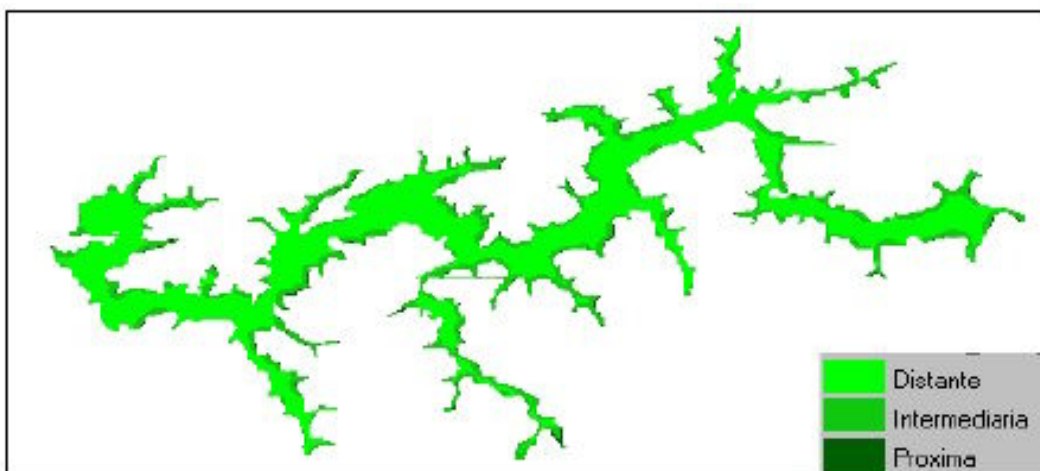


Figura 10 – Mapa de distância entre as classes de turbidez e a classe de baixo potencial à erosão

Analisando as Figuras 8, 9 e 10 nota-se que a classe denominada próxima (verde escuro) às áreas de alto potencial do solo à erosão são quase inexistentes, para os três cruzamentos com o mapa de classes de turbidez. Isso se justifica pelo fato das classes serem gerais e pelo fato do fenômeno ter uma escala de variabilidade mais fina, sendo assim, os intervalos de classe identificados acabam não tendo sensibilidade. A partir dos mapas, pode-se inferir então, que a

distribuição das classes de turbidez não depende tão somente da distância a que essas se apresentam das classes (alto, médio e baixo) de potencial do solo à erosão. Uma ilustração clara desta situação pode ser visualizada na Figura 11 (a) a seguir, onde as classes de turbidez definidas como maior não se apresentam próximas às áreas de alto potencial à erosão. A Figura 11 (b) confirma este fato, pois mostra que a classe denominada próxima não existe nesta mesma área.

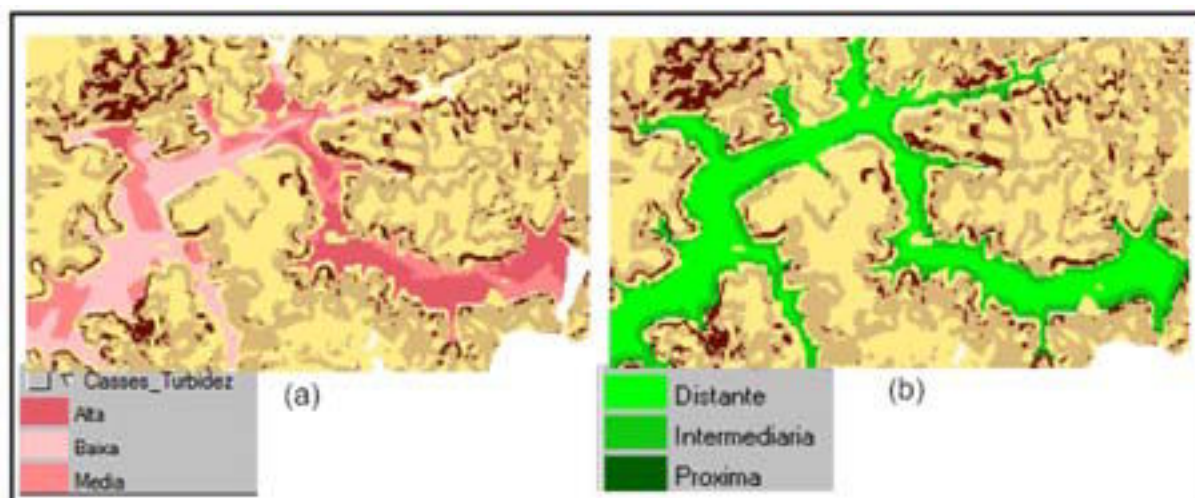


Figura 11 – (a) mapa de potencial à erosão associado ao mapa de classes de turbidez e (b) mapa de potencial à erosão associado ao mapa de distância da classe denominada alto potencial às classes de turbidez

A Figura 12 (a) a seguir mostra que as classes de maior turbidez apresentam-se próximas às áreas de

floresta e próximas às áreas de baixo e médio potencial do solo à erosão.

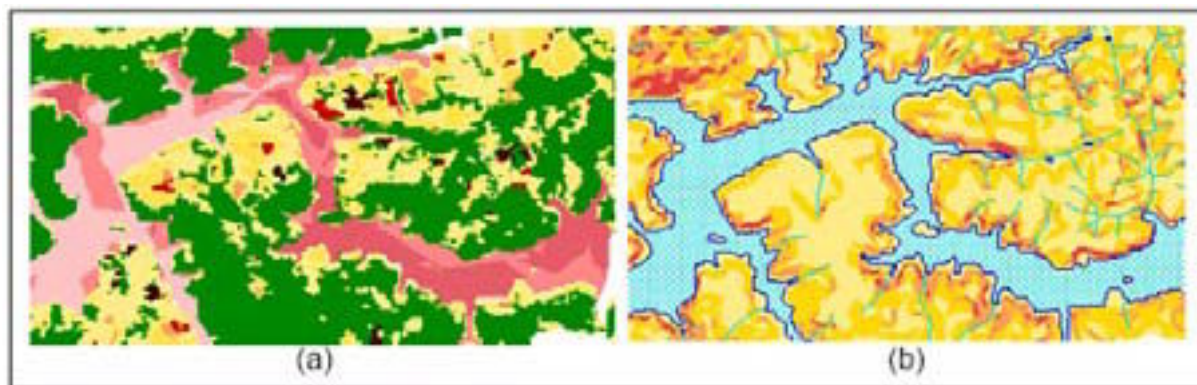


Figura 12 – (a) associação das classes de turbidez com a cobertura do solo (floresta) e (b) associação das classes de turbidez com o mapa de potencial à erosão

CONCLUSÕES

Levando em consideração as variáveis abordadas, as operações realizadas, os mapas produzidos e o fato de que reservatórios sofrem influência de quatro dimensões (lateral, longitudinal, vertical e temperatura) pode-se concluir que a hipótese estudada, na qual foi analisada se a distribuição espacial da turbidez no reservatório pode ser determinada pela distância das classes de turbidez às classes de potencial de transporte de sedimentos, não é verdadeira, como mostra a Figura 11.

No desenvolvimento do trabalho verificou-se que a distribuição espacial da turbidez também é resultado da atuação de outras variáveis, como declividade, tipos de solo, cobertura do solo, morfologia da área de estudo (profundidade e atuação do vento), porém, o fato da relação entre as classes de turbidez e as classes de potencial do solo à erosão ter sido tênue, não se deve tão somente aos fatores hidrodinâmicos,

mas também ao fato de que na área estudada, a turbidez não é um problema, assim como também não existem áreas críticas de erosão.

No presente trabalho, a declividade e a cobertura do solo mostraram-se bastante responsáveis pela distribuição espacial da turbidez, como mostra a Figura 12. A Figura 12 (a) mostra que classes de maior turbidez apresentam-se próximas à classe de floresta do mapa de cobertura do solo, mesmo essas áreas apresentando baixo e médio potencial do solo à erosão, o que significa que a floresta é responsável pelo aporte de material orgânico, que provoca a turbidez. Analisando a Figura 12 (b) verifica-se que os afluentes apresentam-se também como responsáveis pelo carreamento de material.

Como recomendação para trabalhos futuros sugere-se que se possua uma maior quantidade de variáveis, para que se possa inferir de forma mais adequada quais os fatores que mais contribuem para a distribuição espacial da turbidez.

BIBLIOGRAFIAS

Barbosa, C. C. F. Álgebra de mapas e suas aplicações em sensoriamento remoto e geoprocessamento. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto. INPE, São José dos Campos 1997. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/teses/claudio/CAP1.html>>. Acesso em: 2007.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente-Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução no20 de 18 de junho de 1986, Resoluções do CONAMA, Brasília, DF, 1aEd, 2006. Disponível em : <<http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/61AA3835/LivroConama.pdf>>. Acesso em: fev. 2007.

CAMARA, G. et al. Álgebra de Mapas. Cap.8. Notas de aula. 2007.

Câmara, G. Modelos, linguagens e arquiteturas para banco de dados geográficos. São José dos Campos. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 1995.

CHARACTERIZAÇÃO geral da UGRH 10, 2000. Disponível em: <<http://www.rededasaguas.org.br/comite/relsmstseg.pdf>>. Acesso em: nov. 2006.

ESTEVES, F.A. Fundamentos de Limnologia. 1998. Interciência/FINEP, Rio de Janeiro: 575 p.

FELGUEIRAS, C. A. e CÂMARA, G. Modelo Numérico do Terreno. Cap.7. Notas de aula. 2007.

QUEIROZ, R. P. Mapeamento da cobertura do solo na bacia do reservatório de Itupararanga – SP. 78p. Trabalho de Graduação – Universidade Estadual Paulista, SP. 2006.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Catálogo de Imagens CBERS. Disponível em: <www.dpi.inpe.br/catalogo>. Acesso em: 2006.

MOTA, S. Preservação e Conservação de Recursos Hídricos. 2aEdição. Rio de Janeiro: ABES, 1995.

MOTA, S. Introdução à engenharia ambiental. Rio de Janeiro: ABES, 2003. 419p.

REBOUÇAS, A. C. BRAGA, B.; REBOUÇAS, A. C.; TUNDISI, J. G. (Org.). Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. 2º Edição. São Paulo: Escrituras Editora, 2002.

ROCHA, R.R.A. & THOMAZ, S. M. Variação temporal de fatores limnológicos em ambientes da planície de inundação do alto rio Paraná (PR/MS – Brasil). 2004. Acta Scientiarum, p. 261- 271.

SOS ITUPARARANGA. Caracterização Geoambiental da Bacia da Represa de Itupararanga, Bacia Hidrográfica do Rio Sorocaba – SP. Disponível em: <<http://www.sositupararanga.com.br/biblioteca/index.asp>>. Acesso em: fev. 2007.

SAITO, E. A..Mapeamento dos níveis de turbidez na água a partir da classificação de imagens multiespectrais e multisensor, utilizando redes neurais artificiais. Relatório de atividades parciais PIBIC 2006/2007.

TUNDISI, J. G. & STRASKRABA, M., Gerenciamento da Qualidade da Água de Represas. 2000. RIMA. 251p.

UFRRJ – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Pesquisa em Turbidez. Disponível em: <<http://www.ufrj.br/institutos/it/de/acidentes/turb.htm>>. Acesso em: 2007.

VIEIRA, M. S.; FERREIRA, J. R.; CASTRO, P. M. G.; ROCHA, A. A. Aspectos da química da água e do sedimento do reservatório de Ibitinga (São Paulo – Brasil – 21° 45' S e 48° 50' W). São Paulo: Boletim do Instituto de Pesca, 2002. 15p.

Adecuación del DEM del SRTM de 90 metros para usos hidrológicos en llanuras

Sergio Masuelli;¹ Pablo M. Vazquez² y Omar Faure³

1. Instituto Mario Gulich, CONAE-UNC, Ruta C45 km 8 Córdoba (5187) Argentina, Prof. Asociado, sergio.masuelli@conae.gov.ar

2. INTA Rauch, EEA Cuenca del Salado. Av. Belgrano 416 (7203) Rauch, Buenos Aires Argentina. Investigador, pmvazquez@correo.inta.gov.ar

3. UTN Fac. Reg. Concepción del Uruguay, Ing. Pereyra 676 C. P. E3264BTD Concepción del Uruguay Entre Ríos República Argentina, Prof. Asociado, ofaure@frcu.utn.edu.ar

Palabras claves: DEM, SRTM, hidrología de llanuras, filtros

RESUMEN

El tener a disposición el DEM del SRTM de 90m ha cambiado significativamente la calidad de la información topográfica disponible, dado que es una mejora sustantiva respecto del GTOPO 30 (900m de resolución espacial) y de las cartas del IGM en muchos casos también, puesto que su alta resolución lo hace sensible a cambios en la topografía debido a obras humanas.

Sin embargo, el DEM del SRTM que se baja por internet desde la página de la Universidad de Maryland tiene esencialmente la información en un estado crudo por cuanto la altura que muestra para cada píxel tiene que ver con la primera superficie reflectante, es decir por ejemplo que está dando cuenta del tope de la foresta y no del suelo en sí mismo. Además es reconocido por el USGS que estos datos tienen algunas fallas, como ser datos extremadamente altos o extremadamente bajos, especialmente en zonas que involucran cuerpos de agua pues su nivel de backscatter es muy bajo y por lo tanto su procesamiento es generalmente muy ruidoso. Por ello se recomienda al usuario que se interiorice con las características del DEM (resolución, precisión, generación de datos espurios, etc.) para juzgar la utilidad de esta información para la aplicación específica que se desea. Es claro que los datos espurios que tiene pueden determinar la total imposibilidad para un uso específico mientras que para otra aplicación resultar éstos irrelevantes.

La resolución vertical (relativa) declarada es mejor que 10m, aunque algunos estudios la sitúan en alrededor de 2m para la versión de 30m, y los datos están digitalizados al metro. Por encima de esta resolución observamos que para zonas muy planas está presente un ruido de baja frecuencia de 1 metro de amplitud que es notable en zonas de llanura en dirección NO-SE aproximadamente.

Por todo lo antes mencionado, el uso directo de este DEM para modelos hidrológicos en zonas de llanuras puede ser muy problemático. Por cuestiones de estabilidad numérica para pendientes inferiores a 1:1000 y para celdas de 100m se necesitan precisiones verticales del orden de algunos

centímetros.

En tal sentido, en el presente trabajo mostramos el DEM resultante luego de diversas mejoras para su utilización como base topográfica para un modelo hidrológico en llanura. Estas incluyen el filtrado del monte (usando imágenes Landsat), el filtrado del ruido de baja frecuencia y amplitud mencionado, ruido de alta frecuencia en general y correcciones para cuerpos de agua.

ABSTRACT

The accessibility to the SRTM 90m DEM has greatly changed the quality of the available topographic information. It is a significant improvement if it is compared to the GTOPO 30 (900m spatial resolution) and also, to the IGM charts, since its high resolution makes it sensitive to the any modification in the topography of the observed areas as a result of man-made changes.

However, the SRTM DEM of that can be downloaded from the webpage of the University of Maryland basically provides information which has not been completely processed, as the height per pixel it shows has to do with the reflecting surface that appears first, that is, it accounts for the top of the forest and not of the ground itself. In addition, USGS has recognized there are some faults in these data: they may be extremely high or low, especially in areas where there are masses of water involved, as their backscatter level is too low and consequently, their processing is generally very noisy. For this reason, users are recommended to be thoroughly familiar with the characteristics of the DEM (resolution, accuracy, generation of spurious data, etc) to be able to evaluate the usefulness of the information for any specific application. It is clear that the spurious data may determine the impossibility to use it for certain applications while they are irrelevant for others.

The vertical resolution (relative) reported is better than 10 m, although some studies set it around 2 m for the 30m version and data are digitalized to the meter. Beyond that resolution, we observed a low frequency noise of 1 m of amplitude in very flat areas. This is remarkable in the plains located in a NW - SE direction.

El objetivo del presente trabajo es el uso de esta información como base topográfica para modelos hidrológicos de la subcuenca B4 del río Salado en la provincia de Buenos Aires.

La posibilidad de disponer libremente con el Modelo de Elevación Digital (DEM) de 90m , obtenido a partir de la Misión del Shuttle de Topografía por medio de Radar (SRTM), a través de la página web de la Universidad de Maryland, ha cambiado significativamente la calidad de la información topográfica disponible para diversos usos. Además, permite una excelente base de trabajo para el uso combinado de sensores, pues se halla agrupada en el mismo sistema de grilla que las imágenes Landsat ortorectificadas del mismo sitio web, y con un muy alto grado de correregistro entre ellas. En principio, sus características permiten el uso de esta información topográfica sin necesidad de contar con especialistas en interferometría SAR (INSAR). (Rodríguez et al. 2005)

La resolución vertical (relativa) declarada es mejor que 10m, aunque algunos estudios la sitúan en alrededor de 2m para la versión de 30m (Lee et al. 2005), y los datos están digitalizados al metro. Para zonas de llanura los errores mencionados son sensiblemente más bajos pero siempre del orden del metro.

Su relativamente elevada resolución espacial comparada con su antecesor GTOPO 30 (DEM de 900m de resolución espacial) y de las cartas del IGM (Instituto Geográfico Militar de Argentina) permite la visualización de detalles topográficos como ser modificaciones antrópicas del terreno. Esta

En la Figura 1 se muestra el área de estudio. (Vázquez y otros. 2006)



Figura 1: Ubicación geográfica de la Subcuenca B4 del río Salado

2-2. Problemas que presenta el DEM de SRTM

En la figura 2a se muestra un sector, debidamente ecualizado pero sin ningún procesamiento, del DEM bajado del sitio de la Universidad de Maryland correspondiente a la escena Landsat 225-86. En ella podemos observar claramente franjas paralelas en dirección NO-SE, correspondientes a un ruido de baja frecuencia de 1m de amplitud aproximadamente. Este ruido lo hemos observado en otras imágenes, incluso conteniendo franjas en el sentido transversal

formando un cuadrículado. El origen de estas franjas se debe a que las imágenes usadas para obtener este DEM son de modo ScanSAR (Thomas Farr, vicedirector del SRTM comunicación personal). También es claro observar líneas largas que corresponden a caminos y líneas geométricas más cortas que corresponden a cadenas de árboles cortadoras de viento, típicas en la zona. Los caminos son obstáculos reales al escurrimiento superficial pero no así las regiones arboladas.

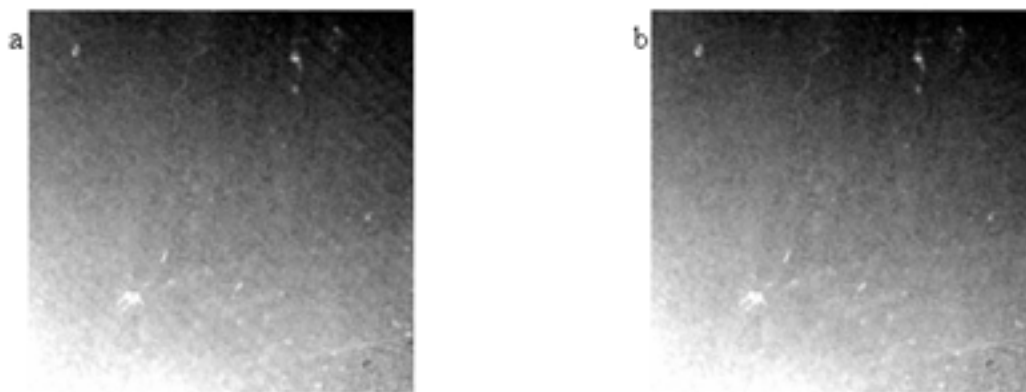


Figura 2: Porción del DEM donde se observa el ruido de baja amplitud. a) Original, b) Filtrado mediante Fourier

En síntesis, para cumplir el objetivo de usar este DEM como información de base para modelos hidrológicos de llanura, necesitamos mínimamente: filtrar el ruido de baja amplitud y frecuencia media; filtrar las arboledas; y corregir la topografía aledaña a las

lagunas.

En la figura 3 se muestra un diagrama con los pasos seguidos para obtener el DEM adecuado a nuestra aplicación.

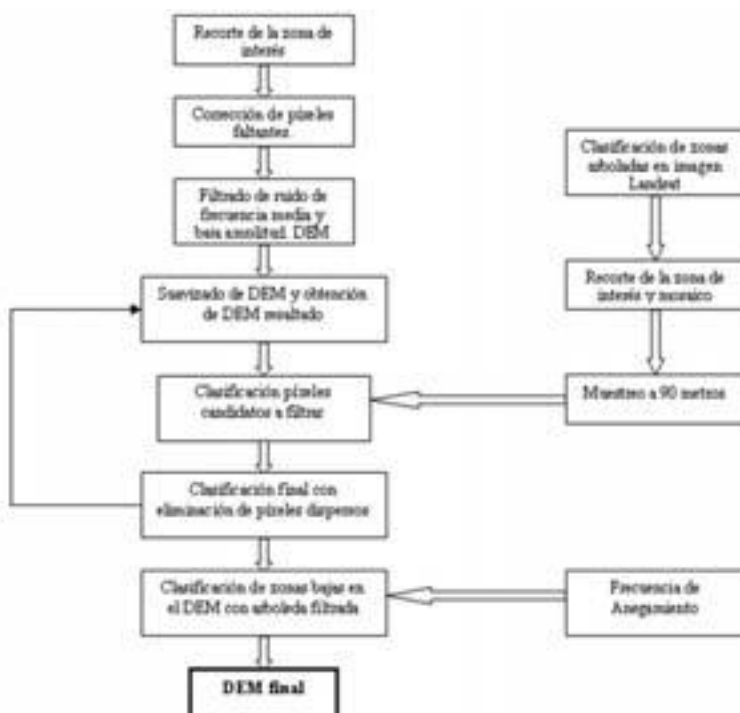


Figura 3: Diagrama de flujo de los procesos para la obtención del DEM adecuado

2-3. Adecuación básica del DEM

Los píxeles con datos faltantes se completaron con los valores de los vecinos más próximos.

Para el filtrado del ruido de baja amplitud y frecuencia media, primeramente se midió sobre la imagen las frecuencias en vertical y en horizontal. Luego, sobre la imagen transformada de Fourier se buscó las regiones correspondientes a la frecuencia medida y sus armónicas y se las eliminó. Antitransformando se obtiene la imagen filtrada que se muestra en la figura 2b.

2-4. Filtrado de la arboleda.

Para el filtrado de la arboleda, primeramente se realizó una clasificación supervisada mediante el

método del paralelepípedo de zonas con firmas espectrales similares a bosque, en las imágenes Landsat 225-85 y 225-86. Luego, esta clasificación fue submuestreada a 90m de píxel.

Para enfatizar los rasgos salientes de la imagen se trató a la como resultante de la suma de una imagen perturbada y otra sin perturbar. La imagen sin perturbar se obtuvo subdividiendo la imagen en cuadrados de 10 píxeles de lado, calculando el valor medio sobre cada uno y luego interpolando cuadráticamente en ambas direcciones para cada punto interior del mismo. La imagen perturbada es simplemente la diferencia entre la imagen original menos la imagen sin perturbación y pueden compararse en la figura 4.

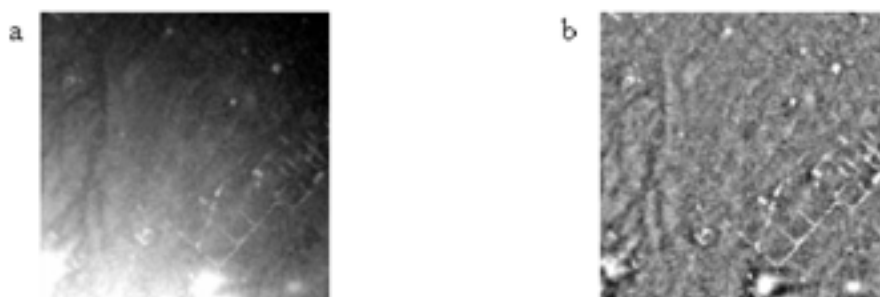


Figura 4: Porción del DEM para observar el resultado por medio del método de perturbación. a) DEM original, b) DEM resaltado

Para clasificar los píxeles candidatos a corresponder a zonas arboladas se determinaron en el DEM resaltado aquellos que correspondieran a árboles en la clasificación del Landsat y con alturas mayores a 4,5m. Luego en forma iterativa se hizo crecer la clasificación a los píxeles contiguos con alturas mayores a 2m. Finalmente, se eliminaron píxeles dispersos.

Como en este proceso es importante la estimación

del DEM sin perturbación y éste valor es inaccesible lo que se hizo fue repetir 4 veces este proceso desde la obtención de los DEM perturbados y sin perturbar. En la figura 5 se muestra en secuencia cómo fue actuando este proceso iterativo en la clasificación de las arboledas para una porción de la escena.

El DEM final filtrando las arboledas resulta de la resta de los valores de esta perturbación al DEM original.



Figura 5: Secuencia de la clasificación de alturas de árboles. El gris oscuro corresponde a alturas sobre la media entre 2 y 4,5m; el gris claro entre 4,5 y 8m; y el blanco a mayores a 8m

2-5. Corrección para zonas bajas.

Como se dijo en la introducción, la cuantificación de la capacidad de almacenamiento de las zonas bajas es una variable crucial para el entendimiento del balance hidrológico del sistema bajo estudio. Claramente, a menos que en forma fortuita la misión SRTM hubiera coincidido con una sequía histórica esta información no está en el DEM resultante pues cada bajo corresponde a un cuerpo de agua.

Como una primera aproximación para corregir este defecto, se excavó directamente usando la clasificación de frecuencia de anegamiento sobre el DEM a partir de un valor de frecuencia de anegamiento realizada por Pablo Vázquez (Vázquez y otros, 2007) en base a una larga serie histórica de imágenes Landsat de la región (200 imágenes). El criterio elegido fue restar 10cm al DEM por cada 10 % de esta frecuencia, a partir del valor de 30 %.

2-6 Filtrado de alta frecuencia.

Luego de las correcciones anteriores persiste en el DEM ruido de alta frecuencia que complica su utilización para modelos hidrológicos. Téngase presente que su resolución en altura (no su error) es de un metro y que para la región extremadamente plana que estamos tratando de simular y teniendo en cuenta el espaciamiento entre puntos de grilla de 90m, el terreno se presenta muy fragmentado de modo que prácticamente el agua sólo podría fluir, en el mejor de

los casos, en trayectos cortos de muy pocos píxeles.

Por lo tanto, para el agua fluya, la discretización en altura debe ser del orden de algunos cm. Para lograr ésto, se le aplicó al DEM un filtro cuadrático de nueve puntos en las direcciones vertical, horizontal y las diagonales principales. El efecto es que suaviza las alturas entre los píxeles vecinos pero respetando las alturas mínimas y máximas locales, que en un filtro de media común serían severamente afectados.

3. RESULTADOS

Como es claro que las correcciones han sido realizadas a nivel local y como la visión total del DEM no muestra las mejoras realizadas, mostramos en la figura 6 una porción del DEM obtenido final, comparado con los datos originales.

La verdadera bondad del trabajo realizado puede verificarse observando los resultados obtenidos por el modelo hidrodinámico que ha usado este DEM (Vázquez y otros, 2006). Como puede observarse en la figuras 7, el agua en superficie obtenida por el mismo modelo puede cambiar sustancialmente dependiendo del DEM. Para estas regiones planas se observa que las "lomas" transversales del DEM crudo se observa que las "lomas" transversales del DEM crudo y la altura de la vegetación pueden constituirse en barreras muy importantes para el escurrimiento del agua.

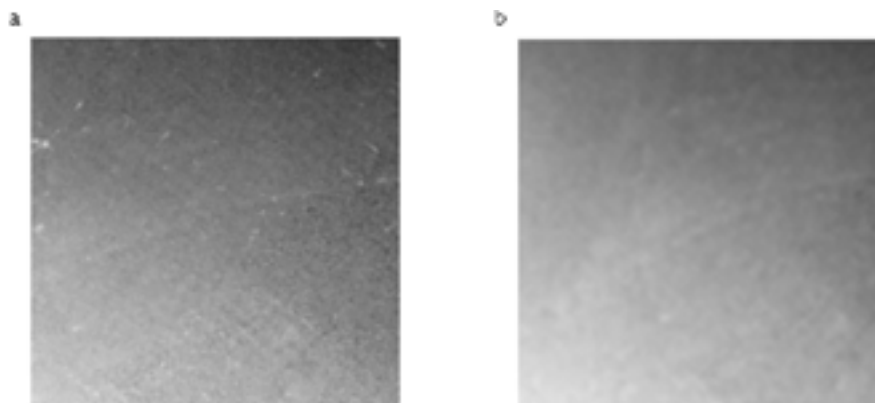


Figura 6: Porción del DEM antes (a) y después de los procesamientos (b)

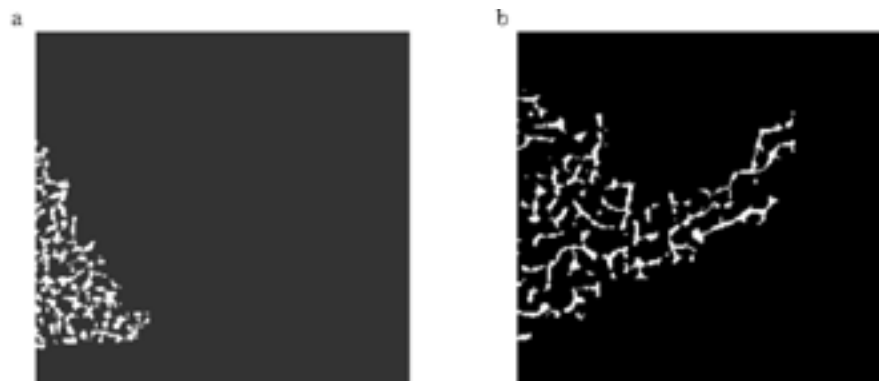


Figura 7: Agua en superficie obtenida por el modelo de escurrimiento luego de 10 días. Usando el DEM de la figuras 6a y 6b, respectivamente

4. CONCLUSIONES

Los problemas señalados el DEM del SRTM muestran que el mismo no puede usarse directamente como base topográfica para un modelo hidrodinámico, en especial para la región de estudio extremadamente plana, manteniendo la resolución espacial real de 90m de píxel. Para lograr este objetivo hay que realizar por lo menos las mejoras y correcciones detalladas en este trabajo, e incluso se deberían hacer con mayor fineza si se espera que el modelo arroje resultados de mayor precisión.

El excavado del DEM para corregir cuerpos de agua es una corrección muy importante que debe hacerse con cuidado, pues entender la dinámica de estas microcuencas y sus interrelaciones es importante para comprender el funcionamiento del sistema completo. La corrección que se hizo ha utilizado la frecuencia de anegamiento aplicada en forma general y uniforme sobre todo el dominio, lo cual puede estar realizando sobrecorrecciones en varios lugares y por lo tanto distorsionando el DEM.

Consecuentemente, pensamos que más conveniente sería aplicar esta corrección en forma selectiva, aplicándola sobre una máscara de cuerpos de agua obtenida a partir de una imagen Landsat cercana a la fecha de la misión SRTM (febrero de 2000).

Por otra parte, algunos de los procesamiento realizados pueden ser extendidos a otras aplicaciones. Por ejemplo, el método usado para el filtrado de la foresta puede servir para clasificar zonas arboladas, dando además una idea de su altura.

Agradecimientos.

Los autores agradecen a las instituciones a las cuales pertenecen y que posibilitaron la realización de este trabajo, INTA y FRCU-UTN. Así mismo agradecen al Comodoro Villanueva y al capitán Boolsen del SMN por la información meteorológica proporcionada, a la CONAE y a las profesoras Hormaiztegui y Kay, de la FRCU-UTN, por la traducción al inglés de los resúmenes.

BIBLIOGRAFÍA

Lee, I.S., H.C. Chang, and L. Ge, 2005: GPS Campaigns for Validation of InSAR Derived DEMs. *Journal of Global Positioning Systems*. Vol. 4, No. 1-2: 82-87.

Lehner, B., K. Verdin and A. Jarvis, 2006: *HydroSHEDS Technical Documentation*. World Wildlife Fund US, Washington, DC. Available at <http://hydrosheds.cr.usgs.gov>.

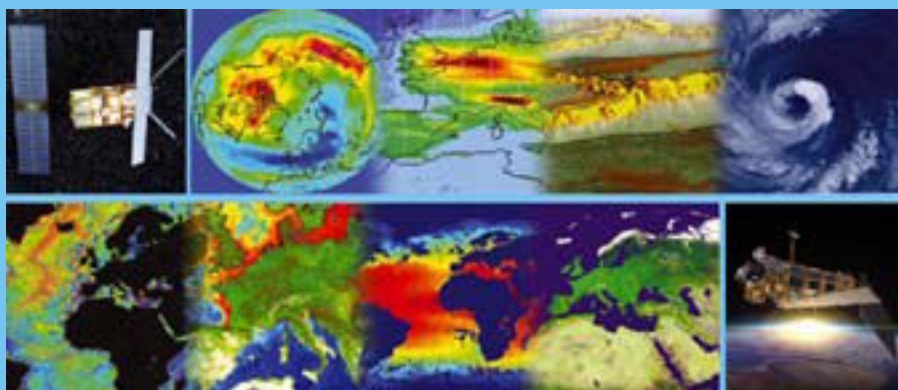
Rodríguez, E., C.S. Morris, J.E. Belz, E.C. Chapin, J.M. Martin, W. Daffer, and S. Hensley, 2005: An Assessment of the SRTM Topographic Products. JPL D-31639, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 143 pp (<http://www2.jpl.nasa.gov>

[/srtm/SRTM_D31639.pdf](#))

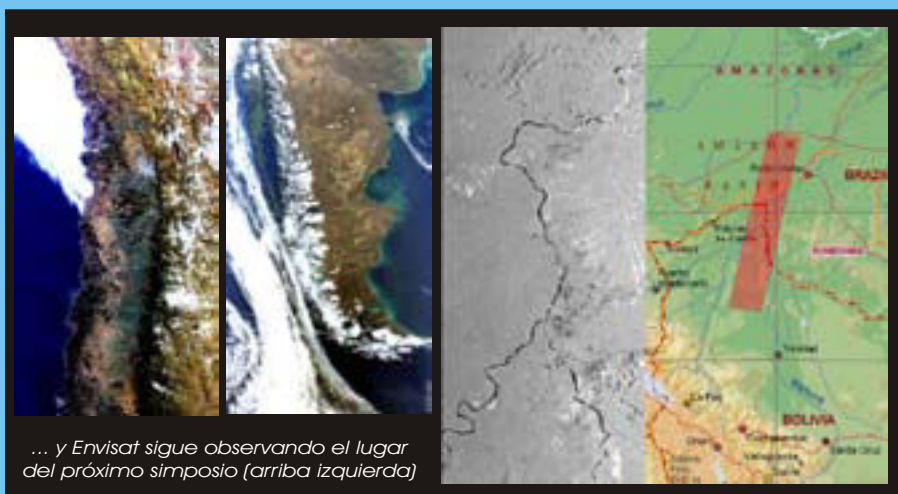
Vázquez, P.M., S. Masuelli, G.R. Platzeck y D. Barrera, 2006: Modelo hidrológico con uso intensivo de información satelital para la subcuenca B4 del Río Salado Bonaerense. XII Simposio Internacional SELPER Colombia.

P. Vázquez, S. Masuelli, G. Platzeck y O. Boolsen, 2007: Mapa de riesgo hídrico. XII Congreso de Teledetección de la Asociación Española de Teledetección, Mar del Plata, Argentina. <http://hydrosheds.cr.usgs.gov/datasets.php>

Sitio web del GLCF de la Universidad de Maryland: <http://glcfapp.umiacs.umd.edu/>



ESA promueve el desarrollo y la cooperación internacional



... y Envisat sigue observando el lugar del próximo simposio (arriba izquierda)



ESA - ESRIN

Via Galileo Galilei,
Casella Postale 64,
00044 Frascati (Roma)
ITALIA

Tel: (39.06) 94180.409

Fax: (39.06) 94180.280

Att: Sr. Francesco Sarti (América Latina)

ESA - Asuntos Internacionales

8-10 rue Mario Nikis,

75738 PARIS Cedex 15, FRANCIA

Tel: (33.1) 5369.7731, Fax: (33.1) 5369.7627

Att: Sra. Marie Elisabeth De Vel (América Latina)



REVISTA - JOURNAL SELPER

VOL. 28, Nº 1, 2009

ECUADOR 1980 - 1983	CHILE 1983 - 1986	BRASIL 1986 - 1989	ARGENTINA 1989 - 1991	PERU 1991 - 1993	COLOMBIA 1993 - 1995	MEXICO 1995 - 1997	VENEZUELA 1997 - 1999	ARGENTINA 2000 - 2002	BOLIVIA 2002 - 2004	CHILE 2004 - 2006	COLOMBIA 2006 - 2008
CUBA 2008 - 2010											