



Madera y Bosques

ISSN: 1405-0471

publicaciones@ecologia.edu.mx

Instituto de Ecología, A.C.

México

Flores Garnica, José Germán; Mendoza B., Martín Alfonso; Aguirre Bravo, Celedonio  
Monitoreo de ecosistemas con estrategias geoestadísticas, una aplicación de gran escala en Jalisco,  
México  
Madera y Bosques, vol. 13, núm. 2, otoño, 2007, pp. 97-104  
Instituto de Ecología, A.C.  
Xalapa, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61713208>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

## Monitoreo de ecosistemas con estrategias geoestadísticas, una aplicación de gran escala en Jalisco, México

### Ecosystem monitoring through the use of geostatistic strategies, a large scale application in Jalisco, Mexico

José Germán Flores Garnica\*<sup>1</sup>, Martín Alfonso Mendoza B.\*<sup>2</sup>  
y Celedonio Aguirre Bravo\*<sup>3</sup>

#### RESUMEN

El proyecto de Inventario y Monitoreo de los Recursos Naturales de Jalisco, México (IMRENAT), es un proceso innovador que propone una aplicación práctica de las herramientas de modelado estadístico geoespacial para reportar creiblemente la condición del territorio. Aprovechando las interconexiones que existen entre atributos del terreno, la vegetación, las actividades humanas y lo detectable con sensores remotos multiespectrales, se pueden construir modelos estadísticamente válidos que reflejan las relaciones espaciales y las tendencias dinámicas de los atributos del territorio. Este tipo de modelos permiten generar productos de geoinformación de mayor utilidad que la información geográfica de naturaleza cartográfica, y que la información pictórica proveniente de interpretar imágenes de sensores remotos. Estos productos geoespaciales tienen la capacidad de describir distintos niveles de resolución y de escala.

#### PALABRAS CLAVE:

Inventario forestal, modelos geoestadísticos, monitoreo

#### ABSTRACT

The Inventory and Monitoring of Natural Resources of Jalisco, Mexico (IMRENAT), is an innovative process suggesting a practical application for geospatial statistical modeling to credibly report the condition of land resources. Taking advantage of interconnections among terrain attributes, vegetation, human activities and multispectral remote sensing information, it is possible to develop statistically valid models depicting land resources spatial attributes and dynamic trends. These types of models enable us to create geoinformation products of greater practical utility than regular cartographic products, or geographic information derived from imagery interpretation. Geospatial products have the capability to describe different scales and resolution levels.

#### KEYS WORKS:

Forest inventory, geostatistical models, monitoring

\*1 Centro de Investigación Regional Pacífico Centro (CIRPAC), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Parque Los Colomos s/n. Col. Providencia, 44660 Guadalajara, Jalisco. Teléfono : (33) 36 41 35 75. Fax: (33) 36 41 35 98. flores\_german@inifap.gob.mx

\*2 Autor responsable de la correspondencia: Fideicomiso para la Administración del Programa de Desarrollo Forestal del Estado de Jalisco (FIPRODEFO), Jalisco. Bruselas 626 Col. Moderna, 44190 Guadalajara, Jalisco. martinmendoza@yahoo.com

\*3 Research Coordinator for the Americas. Consortium for Advancing the Monitoring of Ecosystem Sustainability in the Americas (CAMESA). USDA FS Rocky Mountain Research Station. 2150 Centre Av. Building A, Fort Collins, Colorado 80526-1891 USA. caguirrebravo@fs.fed.us

## INTRODUCCIÓN

Informar sobre el estado actual y los cambios en el ambiente, así como sobre las condiciones del mundo (p.ej. FAO, 2006), es un asunto de tal relevancia actual, que se ha creado de hecho una nueva rama de actividad conocida como monitoreo. El avance del conocimiento en esta rama ocurre no únicamente por su importancia, también es un vigoroso proceso impulsado por la dificultad técnica y humana que conlleva.

Las principales metas buscadas en el monitoreo generalmente se relacionan con la credibilidad de la información resultante sobre la dinámica de los atributos del terreno, y en su momento, la posibilidad de sustentar técnicamente la calidad de esa información (Busch, 2005; Schreuder *et al.*, 2003).

Gran parte del impulso a la innovación y a la adopción de ideas y tecnología de monitoreo es motivado por la deficiente satisfacción de las necesidades y expectativas de los usuarios que han recurrido a los medios geoinformáticos tradicionales disponibles. En particular se ha cuestionado el papel de la información que proveen las agencias informativas de los gobiernos nacionales (Longhorn, 2005). De esta información comúnmente se ha criticado la omisión de evidencias sobre la validez y procesos de validación de la geoinformación.

Entre las tendencias fuertes que empiezan a mostrar alientos, se tiene la posibilidad de que la tecnología de cómputo actual ya permite interoperabilidad de una multiplicidad de bases de datos distribuidas en localidades y jurisdicciones distintas. Otra tendencia importante en el monitoreo es la que pretende cambiar paradigmas geográficos, y en particular, se plantea un nuevo posicionamiento mucho más modesto en las prioridades de la sociedad moderna para el

arte de la cartografía como modo de representación de la realidad geográfica (Brodersen, 2005). Esta nueva tendencia busca presentaciones de la geoinformación que sean mejor adaptadas al contexto cultural y a las circunstancias del usuario, y que no impongan limitaciones o prejuicios producto de la tradición del arte cartográfico, o producto de la forma en que se definen y se representan las categorías que son el medio para representar a los geodatos.

Una de estas nuevas formas de generar productos de geoinformación es la que resulta de aplicaciones de geoestadística y modelado geoespacial (Schreuder *et al.*, 2003). Este tipo de aplicaciones ha sido reportado en literatura (Kalas *et al.*, 2003; Reich *et al.*, 2004), en escalas de tipo experimental y ámbito temático limitado a uno o unos pocos asuntos. Hay dos casos reportados donde se tienen en marcha proyectos de gran envergadura destinados a reportar la condición de los ecosistemas en amplias zonas territoriales, una de ellas es Colorado Digital (Pellicane y Burns, 2005), y el otro, es el proyecto de Inventario y Monitoreo de los Recursos Naturales de Jalisco (IMRENAT) en Jalisco, México (Alonso *et al.*, 2006).

Es intención de este trabajo dar evidencia de estos avances mediante el uso de un ejemplo práctico, que en este caso es el proyecto de IMRENAT. En el 2001, el estado de Jalisco decidió proceder con urgencia a llenar demandas de geoinformación para las que eran insuficientes las cifras de instituciones nacionales como las de INEGI y SEMARNAT e internacionales como la FAO. De ello surgió la necesidad de crear un instrumento para proveer tal geoinformación bajo las directrices anotadas arriba. IMRENAT ha reportado ya un buen número de resultados que muestran las cualidades y capacidades de productos de geoinformación y geosíntesis que siguen

la pauta que marca la frontera del conocimiento en esta materia. Un propósito colateral de este trabajo es difundir algunos de estos resultados en un formato que exhibe las cualidades y potencialidades de este diseño de monitoreo de ecosistemas.

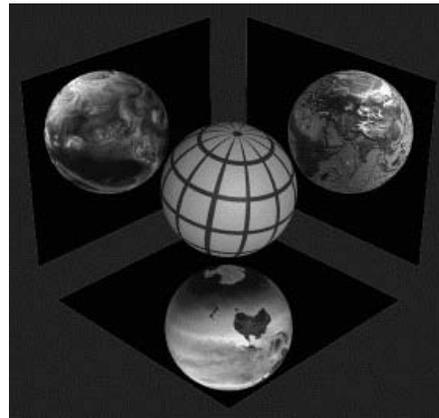
#### ESTRATEGIA TEÓRICA DE IMRENAT

En la figura 1 se muestra esquemáticamente la lógica que soporta metodológicamente el trabajo de IMRENAT. Las implicaciones lógicas de esta imagen aluden a que los elementos de carácter más estable, como la topografía, geología y suelos, son explicación eficaz de los procesos y cualidades superiores, como

sería el clima, que a su vez puede ser usado, junto con las capas anteriores para explicar la vegetación y fenómenos circunstanciales como el fuego. Todas estas capas temáticas, una vez acumulada suficiente porción de secuencias en tiempo de ellas, son base explicativa de los fenómenos antropogénicos como el uso del suelo y las variables geográficas de origen cultural, histórico, jurisdiccional y administrativo. Los elementos tangibles y los interpretados en esa imagen requieren de un marco abstracto de referencia, representado aquí por la imagen central de un globo dentro de una retícula de coordenadas, que permita hacer las operaciones lógicas y matemáticas para unir los distintos tipos de información.

## MARCO GEO-ESPACIO-TEMPORAL

Ö<sub>XYZ</sub> =



**X = Sistemas físico objeto de monitoreo (i=1,...n).**

**Y = Aspectos de X objeto de monitoreo (i=1...n).**

**Z = Datum geográfico de X y Y (e.g., latitud, longitud, altitud, tiempo).**

Figura 1. Esquema conceptual del proyecto IMRENAT

El aspecto relevante aquí es el fuerte apoyo que avances recientes en materia de estadística geoespacial (Schreuder *et al.*, 2003), permiten manejar y potenciar la enorme masa de datos que implica un censo del territorio, implícito en el barrido de los sensores remotos multiespectrales. A propósito de esto, cabe mencionar que en IMRENAT se ha usado Landsat 7 TM, 2002, 2003 y 2004, serie que se irá complementando con el tiempo con otras imágenes para 2005 en adelante.

Con este gran poder estadístico se puede modelar el comportamiento de variables de la "realidad a nivel del suelo", y lograr estimadas no sesgadas, de alta calidad y poder estadístico. Esta "realidad a nivel del suelo" es, en principio, producto de mediciones de una red de sitios permanentes, puesta en campo con un diseño que permite el estudio de relaciones espaciales. Para este último fin, la muestra se asigna en proporción a la variabilidad que los datos de campo exhiben respecto a las variables usadas en estratificación. Lamentablemente, los datos de los sitios en el terreno son sólo unas pocas cifras de eventos específicos, pero con los modelos temáticos apoyados en la información satelital y procedimientos de varianza forzada (tipo *bootstrapping*, *jackknifing*. Schreuder *et al.*, 2004), se da lugar a representaciones modeladas de estas capas temáticas con estimadores para el total de píxeles dentro del área de estudio. Estas representan no tanto a la situación del píxel en el momento de la medición, sino a la población de valores teóricamente plausibles en ese píxel para esa variable.

Los procedimientos concretos para el modelado aludido se hacen por vía de árboles binarios de clasificación, para las variables binomiales y categóricas, y árboles de regresión y modelos de superficie de tendencia (Reich, 2005). Estos procedimientos se validan después mediante simulación *Montecarlo* que

alimenta un proceso recursivo de 10 ciclos de validación cruzada (Efron y Tibshirani, 1993), además de pruebas estadísticas de bondad de ajuste propias de modelos espaciales (Agterberg, 1984). Finalmente, los procesos y patrones de tendencia en escala corta (resolución de 10 m, Reich *et al.*, 2005b), se estudian modelando la dispersión de errores de los modelos de escala gruesa (resolución de 30 m), mediante modelos de regresión y modelos de clasificación binaria, reiterando hasta que no se puedan agregar variables con poder explicatorio estadísticamente significativas, al modelo que predice los errores.

Cabe aclarar que a lo largo de todo este proceso se mantiene una constante vigilancia de parte del analista para detectar elementos que requieran acción correctiva en alguna parte del proceso de modelado, y en especial en la porción de poda de los árboles binarios y árboles de regresión. Para auxiliar en esta tarea al analista, se desarrolló un procedimiento mecanizado que genera imágenes cartográficas de etapas intermedias del modelado, dentro de las cuales es posible examinar el modelo para visualmente detectar incongruencias o aspectos que puedan mejorar. Este proceso ha sido codificado en un programa llamado GEOSIS (Solano *et al.*, 2005), escrito en C+ en un entorno Linux (Red Hat Inc., 2006), para operar en estaciones de trabajo de gran capacidad, si bien ya se ha migrado a un formato que opera dentro de plataformas Windows (Microsoft Corp., 2006). GEOSIS mecaniza el proceso de extracción de datos espectrales y de elevación, así como la compilación y edición de datos de campo y de fuentes secundarias, y prepara las matrices que alimentan el modelado estadístico. Una vez que se tienen preparadas estas matrices de datos, se usa un paquete estadístico (S-plus 7 Insightful Corp., 2006) para ajustar los modelos. A la salida del proceso estadístico, GEOSIS recupera los reportes de resultados, resuelve los

modelos estadísticos, y con sus predicciones despliega las representaciones cartográficas de los modelos, para consideración del analista, quien repite el proceso con modificaciones las veces que su criterio considere necesario para obtener un producto aceptable. Finalmente, se corren las librerías que fueron diseñadas en S-plus para fines de validación cruzada y modelado de errores. Si los parámetros de ajuste del modelo son satisfactorios, GEOSIS toma el modelo obtenido, lo aplica a la malla de píxeles del total del área de estudio, genera predicciones pixel por pixel, y produce una imagen visual que aparenta ser un mapa, pero que en realidad es la superficie predicha por el modelo para la variable modelada. Esta imagen es estudiada visualmente para detectar posibles incongruencias, errores y necesidades de modificación del modelo, que en caso de aparecer obligan a repetir el proceso para enmendar.

De entre los varios resultados disponibles al momento se tienen 24 capas temáticas de la zona central de Jalisco (Reich *et al.*, 2005b), que fue usada como estudio piloto antes de emprender el establecimiento de la red estatal de sitios permanentes de monitoreo. También se tiene para todo el estado de Jalisco, modelos de elevación (provistos por cortesía de INEGI y NASA), zonas climáticas, y vegetación. El principal resultado ha sido un primer reporte de variables ambientales (Alonso *et al.*, 2006), que contiene una variedad de temas modelados que enfatizan la situación de los recursos forestales estatales. Este énfasis en recursos forestales fue pensado para agregarse a la serie de previos inventarios forestales que han sido realizados a nivel federal y estatal.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una presentación amplia de resultados de este trabajo se presenta en Alonso *et al.* (2006). De este trabajo y a manera de

ilustrar las cualidades de los modelos ya disponibles, se extrajo el caso de la distribución de las coberturas del suelo (Figura 2). La imagen de este modelo se pone a la par de la vegetación como la reporta INEGI, que si bien se trata este último de un estudio ya viejo (datos de 2000), y a escala pequeña (1:250 000), sirve para mostrar de forma gruesa y algo exagerada dos atributos básicos de los productos de IMRENAT: la apariencia general del modelo de IMRENAT es más proclive a gradientes, a mostrar cierta apariencia granulosa en la distribución espacial de los atributos modelados, y a evitar la apariencia de fronteras nítidas que es producto del uso de polígonos fundados en interpretación de la imagen por expertos intérpretes, tal como despliega el caso de INEGI. El otro aspecto, quizá el más importante de resaltar, es que al margen de las diferencias tecnológicas, de escala y obsolescencia, los patrones generales de distribución espacial son casi idénticos, lo que es un elemento empírico que sugiere implícitamente cierta confiabilidad de resultados IMRENAT. Por supuesto, la parte objetiva de esta segunda observación es la que resulta de los análisis estadísticos de los resultados del modelo. En este caso, el modelo mostró una confiabilidad general de 82,9% (Reich *et al.*, 2005a).

Admitiendo que los recursos forestales son motivo de especial atención, también se presenta como ejemplo de resultados MESET la Figura 3, que despliega en tonalidades crecientes de gris, la distribución geográfica de la espesura de las masas arboladas de Jalisco. La espesura o densidad del arbolado en este caso está representada por el área basal ( $m^2/ha$ ). De nuevo la cualidad relevante en este otro resultado es la fina presentación de gradientes y clara distribución de la variabilidad de este indicador.

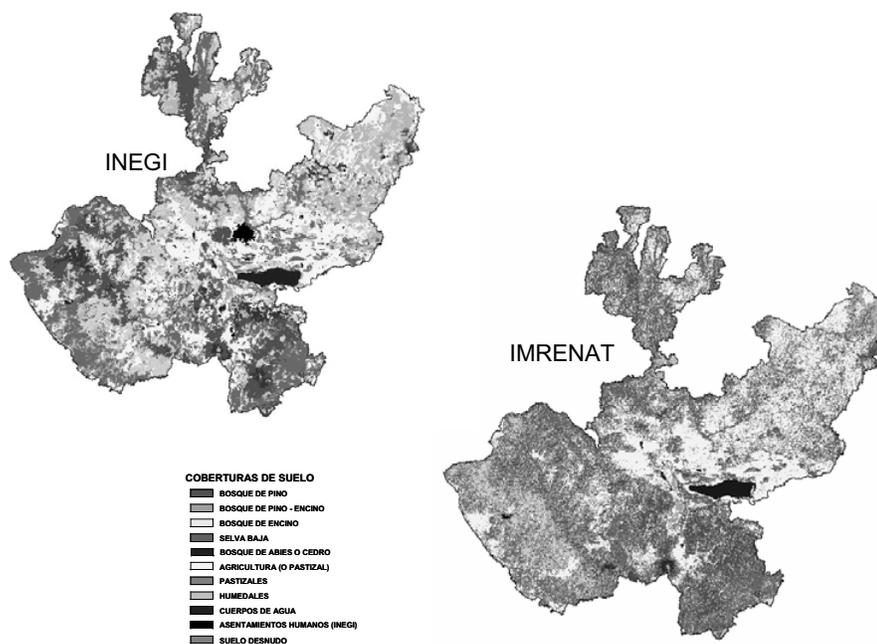


Figura 2. Cubierta del suelo modelada en IMRENAT, en relación a una presentación vectorial (INEGI, serie 2, escala original 1:250 000).

Datos INEGI: [http://mapserver.inegi.gob.mx/map/datos\\_basicos/vegetacion/?c=556](http://mapserver.inegi.gob.mx/map/datos_basicos/vegetacion/?c=556)

## CONCLUSION

IMRENAT es un esquema de monitoreo para el seguimiento espaciotemporal de las variables relacionadas con la sustentabilidad de ecosistemas terrestres que ha mostrado, con sus resultados parciales disponibles en 2006, un potencial atractivo para representar fenómenos que tienen patrones geográficos de comportamiento modelables geoestadísticamente.

Una cualidad lateral en el diseño de IMRENAT es su capacidad de incorporar datos de fuentes diversas, y potencial interoperabilidad con otros esfuerzos y proyectos similares.

## REFERENCIAS

- Agterberg, F.P. 1984. Trend surface analysis. *In*: Spatial statistics and models. (Eds. G.I. Galle and C.J. Willmott) Reidel, Dordrecht, The Netherlands. pp 147-171.
- Alonso Torres, L.A., J.R. Varela Ortiz, C. Aguirre Bravo, M.A. Mendoza B., R.M. Reich, J.G. Flores Garnica, H. Schreuder, E. Talavera Zúñiga, L.J. Flores Rodríguez, A. Martínez Moreno, G. Iñiguez Herrera, R. Solano Barajas, A. de la Rosa Vázquez, R. Posadas del Río y H.E. Nolasco Reyes. 2006. Inventario y Monitoreo de los Recursos Naturales del Estado de Jalisco, REPORTE

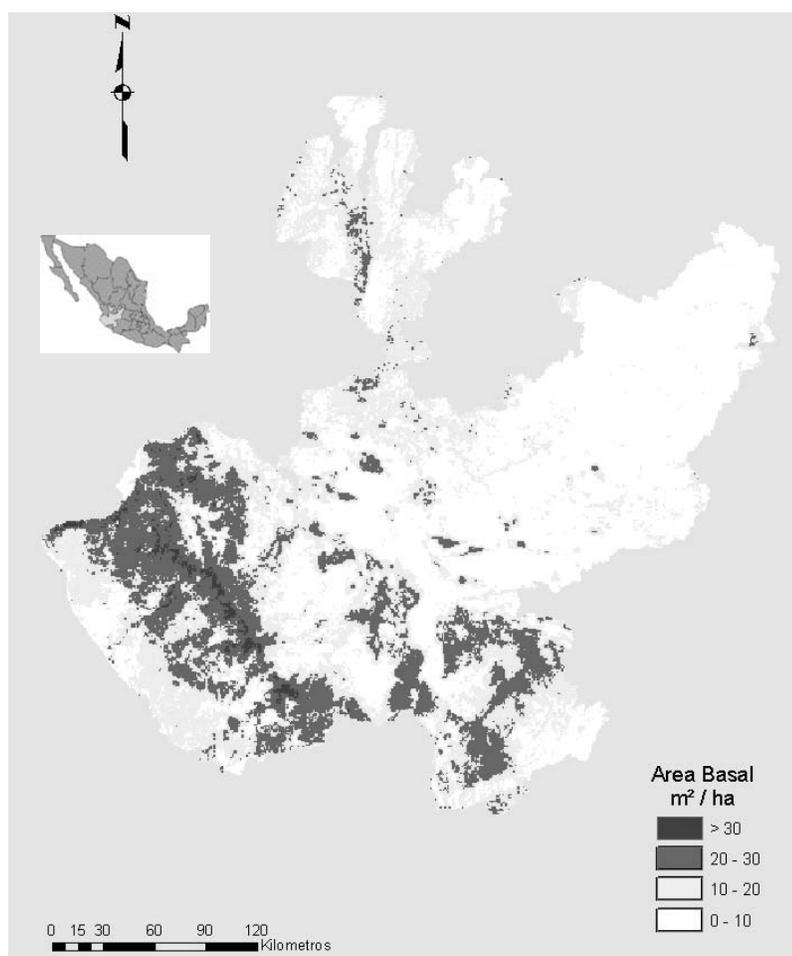


Figura 3. Distribución modelada del área basal del arbolado de Jalisco ( $m^2/ha$ ).

2006. FIPRODEFO Guadalajara Jal. 170p. CD.

Brodersen, L. 2005. Is cartography dead? *Geo* 4(8Sep):28.

Busch, D. E. 2005. Interdisciplinary Approaches to Monitoring and Assessment of Regional Ecosystems: Challenges and Opportunities. *In: Monitoring Science*

and Technology Symposium. CAMESA, USDA FS Rocky Mountain Research Station Proceedings RMRS-P-37CD, Fort Collins CO USA.

Efron, B. y R.J. Tibshirani 1993. An introduction to the bootstrap. Chapman and Hall, Nueva York.

FAO. 2006. The Global Forest Resources Assessment 2005. [HYPERLINK](#)

- <http://www.fao.org/forestry/foris/webview/forestry2/index.jsp?siteId=101&siteTreeId=16807&langId=3&geoid=0>. Visitada 17abr2006.
- Insightful Corp. 2006. <http://www.insightful.com/products/splus/default.asp>. Visitado 18abr2006.
- Kallas, M.A., R.M. Reich, W.R. Jacobi y J.E. Lundquist. 2003. Modeling the probability of observing *Armillaria* root disease in the Black Hills. *Forest Pathology* 33:241- 252.
- Longhorn, R. 2005. Assessing EU-projects. *Geo* 6(4Dec):16.
- Microsoft Corp. 2006. <http://www.microsoft.com/windows/default.mspx> Visitado 18abr2006.
- Pellicane, P.J. y D. Burns. 2005. International significance of the project, Monitoreo para la Evaluación de la Sustentabilidad de los Ecosistemas Terrestres (MESET). *In: Foro CAMESA*. Guadalajara Jal. 29 nov-1 dic 2005. FIPRODEFO, Guadalajara Jal. Méx. CD
- Red Hat Inc. 2006. <https://www.redhat.com/rhell/>, consultada 18abr2006.
- Reich, R. M. 2005. Geostatistical approaches for studying and modeling nature. *In: Foro CAMESA*. Guadalajara Jal. 29nov-1 dic 2005. FIPRODEFO, Guadalajara Jal. Méx. CD
- Reich, R. M., C. Aguirre-Bravo, V.A. Bravo y A. Martínez. 2005a. Mapping the 2002 land cover types of the states of Jalisco and Colima, Mexico. *Reporte Técnico*. FIPRODEFO, Guadalajara, Jal. 37p.
- Reich, R. M., C Aguirre-Bravo, V.A. Bravo, M.A. Mendoza, G. Flores, L.J. Flores, A. Martínez y E. Talavera. 2005b. Análisis de estrategias estadísticas para el avance del monitoreo y dictaminación de los ecosistemas terrestres en el estado de Jalisco, México: Síntesis del Estudio Piloto. *In: Documento Técnico 43*. FIPRODEFO Guadalajara Jal. 99p.
- Reich, R.M., J.L. Lundquist y V.A. Bravo. 2004. Spatial models for estimating fuel loads in the Black Hills, South Dakota, USA. *International Journal of Wildland Fire* 13:119-129.
- Schreuder, H.T., R. Ernst y H. Ramírez M. 2004. Statistical techniques for sampling and monitoring natural resources. USDA FS Rocky Mountain Research Station General Technical Report RMRS-GTR-126, Fort Collins, CO USA. 111p.
- Schreuder, H. T., M.S. Williams, C. Aguirre-Bravo y P.L. Patterson. 2003. Statistical strategy for inventorying and monitoring the ecosystem resources of the states of Jalisco and Colima at multiple scales and resolution levels. USDA FS Rocky Mountain Research Station General Technical Report GTR-107. Fort Collins, CO USA. 15p.
- Solano, R., G. Flores y R. Reich. 2005. GEOSIS: Un sistema de cómputo para el soporte del modelaje espacial. *In: Foro CAMESA*. Guadalajara Jal. 29 nov-1 dic 2005. FIPRODEFO, Guadalajara Jal. Méx.

Manuscrito recibido el 21 de marzo de 2006  
Aceptado el 13 de diciembre de 2006

Este documento debe citarse como:  
Flores Garnica, J.G., M. A. Mendoza Briseño y C. Aguirre Bravo. 2007. Monitoreo de ecosistemas con estrategias geoestadísticas, una aplicación de gran escala en Jalisco, México. *Madera y Bosques* 13(2):97-104