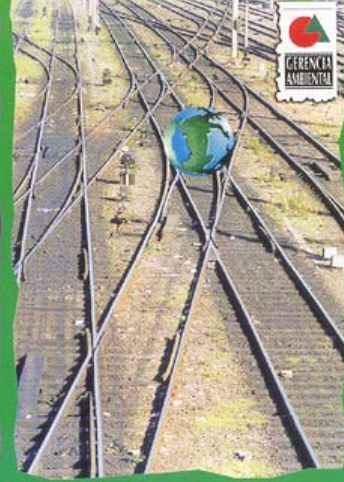
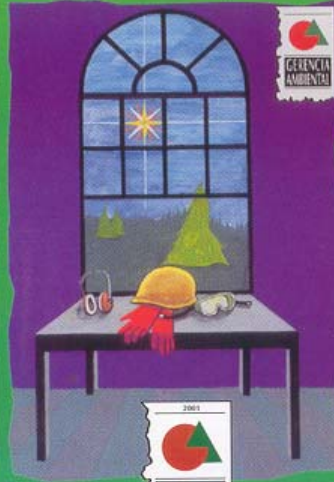
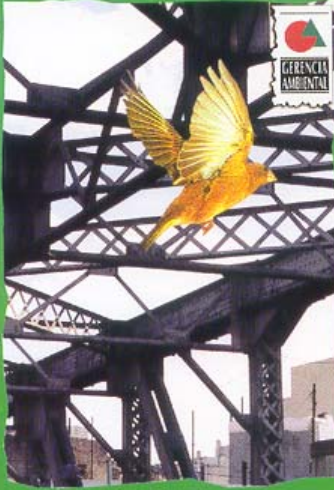
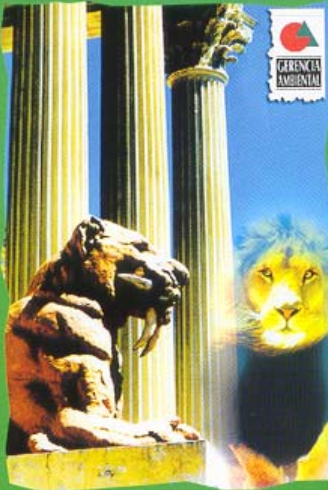
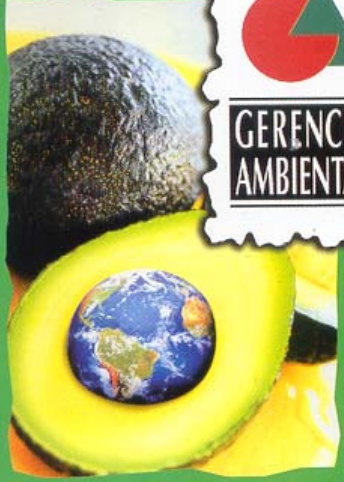




**GERENCIA
AMBIENTAL**



Sistemas de información geográfica (SIG) como herramienta para el análisis del medio ambiente

La tecnología SIG ha ganado definitivo prestigio como aplicación computacional para el manejo de la información espacial. Ha potenciado la obtención de datos de diversas fuentes y, al mismo tiempo, demostró ser eficaz en un amplio espectro de aplicaciones. En el presente trabajo se describe esta tecnología, sus posibilidades técnicas y ejemplos de aplicación ambiental.

por Gustavo D. Buzai y Silvia D. Matteucci

Si bien el SIG ha sido adoptado como herramienta de análisis y presentación de datos por una amplia variedad de disciplinas, como el mercadeo, la educación, la ingeniería, entre otras, su aplicación al estudio del medio ambiente se ha convertido en un vehículo de importancia para la toma de decisiones en diferentes niveles de gestión, por ser considerado el núcleo fundamental de la integración geoinformática (Buzai, 1992).

El variado espectro de aplicaciones multiplica las definiciones de la tecnología SIG, la cual puede ser vista desde cuatro ópticas diferentes, cada una de las cuales constituye una perspectiva específica:

- El entorno de trabajo: "Un sistema basado en la computación para el manejo de datos espaciales" (Marble, 1990).
- La funcionalidad: "Un sistema que permite la obtención, almacenamiento, procesamiento y presentación de datos georreferenciados" (Goodchild, 1990).
- El contenido: "Base de datos con información espacial" (Cebrián, 1988).
- El propósito: "Un sistema de soporte al proceso de toma de decisiones a nivel espacial" (folletos de empresas vendedoras de software SIG).

El SIG como software

El SIG como programa de aplica-

ción está compuesto por subsistemas que operan de manera combinada, y cada uno de ellos constituye un módulo del programa. Estos son:

1. Almacenamiento y organización de datos espaciales gráficos, que se obtienen por digitalización vectorial con una tableta digitalizadora o por digitalización *raster* automática mediante *scanners*, o de archivos provenientes directamente de sensores remotos.
2. Almacenamiento y organización de datos espaciales alfanuméricos, en archivos computacionales, que pueden ser eficientemente recuperados para su ampliación, modificación, tratamiento estadístico o asociación a las correspondientes entidades gráficas georreferenciadas.
3. Tratamiento de datos, o rutinas de análisis espacial realizadas con el contenido de los subsistemas anteriores, que permiten asociar variables, describir la estructura espacial de los elementos cartografiados, y encontrar relaciones entre los diferentes elementos.
4. Presentación de los resultados en mapas, tablas y gráficos a través de los periféricos de salida (pantalla, impresora, *plotter*).

Un SIG total es aquel que posee los cuatro subsistemas; un SIG mínimo posee sólo el subsistema de tratamiento de datos (subsistema central). Ambas configuraciones

tecnológicas cuentan con similar aptitud y cada subsistema puede ser reemplazado por diversos componentes geoinformáticos.

Estructuras básicas de representación de la información espacial

Actualmente existen varios cientos de paquetes de SIG (Wadsworth y Treweek, 1999), desarrollados a partir de 1964 (considerando al CGIS de Canadá-1964 como el primer software SIG). Todos se basan en dos modelos de representación: el discreto o *raster* y el continuo o vectorial, de los cuales derivan el *quadtrees* y el modelo orientado a objetos, respectivamente.

El modelo *raster* utiliza una matriz cuadrada de celdas contiguas de área uniforme, cada una de las cuales contiene información referida a la porción particular del espacio geográfico incluida en ella. Cada celda, unidad mínima de representación espacial, se denomina *pixel* y constituye una unidad de información. El conjunto de celdas constituye una matriz numérica que puede transformarse en colores o grafismos para su presentación. Es posible realizar operaciones matriciales matemáticas y lógicas, para transformar datos, asociar, correlacionar y combinar atributos. En la actualidad el modelo *raster* es considerado el más apto para la aplicación de procedimientos de análisis

espacial y para el ingreso de datos a un SIG de imágenes satelitales (Morain y López Barros, 1996). Además, admite bases de datos en formatos convencionales.

El modelo *quadtree* es una variante del modelo *raster*. La diferencia fundamental es que dentro de una misma composición cartográfica se pueden encontrar diferentes tamaños de pixel. El sistema optimiza la disposición espacial de los mismos utilizando tamaños adecuados para cada distribución espacial. Mayores detalles pueden ser consultados en Dyer (1982).

El modelo vectorial opera en un espacio continuo, en que la información contenida en bases de datos relacionales se representa en puntos (datos puntuales), líneas (lineales) o polígonos (datos areales).

El modelo orientado a objetos se basa en la descomposición del espacio geográfico en unidades elementales denominadas *objetos*, los que contienen toda su información, tanto de atributos como de comportamiento. Representan estructuras de datos complejas que mantienen instrucciones precisas para su creación, tratamiento y destrucción. Los objetos se agrupan en *clases* y se relacionan jerárquicamente. El concepto de *herencia* (un objeto toma atributos de otro del cual deriva y los combina con los propios) tiene particular interés, con el fin de no duplicar información en el sistema. Aspectos específicos pueden encontrarse en Worboys et al. (1990), Crosbie (1993), Davies y Vasconcelhos Borges (1994) y Strauch y Queirós Mattoso (1997).

Procedimientos básicos para la utilización de un SIG

La aplicación de un SIG requiere algunas definiciones previas que servirán como marco para la georreferenciación de la información y para su posterior análisis. Ellas son:

- **Área de estudio:** se debe determinar su extensión (rectángulo dentro del cual se circunscribirá el análisis), la proyección (sistemas de paralelos y meridianos sobre el cual quedará referenciada), los puntos de control con los que se ajustará la cartografía a la proyección, y el mapa base, que representa el diseño cartográfico al

cual se vinculará la información alfanumérica.

- **Método de geocodificación:** se debe elegir un método para el ingreso de datos gráficos. Puede realizarse por teclado, con lo cual se habla de una geocodificación manual, por medio de *scanner*, por *tableta digitalizadora* o por los sensores a bordo de los satélites artificiales.
- **Base de datos alfanumérica:** si se geocodifica manualmente o se obtienen imágenes a partir del uso de *scanners* o sensores remotos se trabajará con una base de datos *raster*; si se utiliza *tableta digitalizadora* para ingresar imágenes vectoriales, se utilizarán bases de datos relacionales, que se enganchan como puntuales, lineales o areales.
- **Transformaciones:** incluye la importación de archivos de todo sistema externo al SIG, el cambio de entidades entre *raster*, *quadtree* y *vectores* y los cambios de escala.
- **Tratamiento de los datos:** la transformación de los números de la matriz mediante la *reclasificación*, que se puede ejecutar mediante comandos, filtros o por técnicas del procesamiento digital de imágenes, permite modificar los colores de la cartografía, preparar las matrices para los análisis estadísticos espaciales, obtener variables derivadas, hallar áreas de influencia de datos puntuales o lineales (*buffers* o *voronoi*), trazar curvas de nivel y caminos óptimos entre puntos de una red, medir distancias y volúmenes.

Ejemplos de aplicación en las ciencias del medio ambiente

Los tres ejemplos que siguen emplean los conceptos teóricos y metodológicos descritos en los puntos anteriores aplicados a bases de datos ambientales.

Cartografía de recursos naturales

El SIG representa un avance importante en la cartografía. Los mapas analógicos (en papel) tienen limitaciones, de las cuales tres importantes son:

1. La información debe simplificarse y reducirse. Algunos mapas ecológicos en papel se tornan incomprensibles por la gran canti-

dad y diversidad de atributos que contienen, y si éstos se cartografían en hojas separadas se dificulta su combinación y asociación.

2. Frecuentemente se requieren varias hojas para cubrir un área dada, dificultando la apreciación sinóptica.
3. El mapa impreso es estático, muestra una situación en un momento dado. Su actualización es costosa y engorrosa puesto que requiere una reimpresión de todo el material. Los recursos tales como la vegetación, el hábitat de vida silvestre, la fertilidad del suelo, entre otros, pueden cambiar en períodos cortos. Los estudios de recursos para la planificación de actividades productivas pierde vigencia rápidamente, especialmente si el proyecto de desarrollo es exitoso y modifica el sitio.

El SIG obvia estas limitaciones porque permite incluir una gran cantidad de información, facilita la actualización de recursos o áreas sin necesidad de rehacer todo el trabajo. Además, permite la representación de variaciones temporales y la obtención de índices de textura, estimadores estadísticos y otras variables derivadas.

Entre 1975 y 1982 se realizó un estudio ecológico regional en un estado económicamente deprimido de Venezuela (Matteucci, Colma, Pla, 1985). El objetivo fue generar información básica para la planificación del desarrollo. Dado que todavía no se había difundido la tecnología SIG ni el procesamiento de imágenes satelitales, el trabajo se hizo mediante fotointerpretación y censos en el terreno, en un período de unos cinco años. La cartografía, en hojas de 1,20 m x 0,60 m, se realizó manualmente. Se produjeron siete mapas (hidrología, suelos, altitud, pendientes, formas de relieve, formaciones vegetales, flora); otros atributos se presentaron en tablas y gráficos por el costo y dificultades de la cartografía. Si bien la información fue útil para la planificación de actividades productivas, existieron las limitaciones mencionadas. Por ello, en el año 2000 se pasó toda la información a soporte digital (Matteucci, Colma, Pla, 2001).

Los siete mapas fueron digitalizados en pantalla, resultando representaciones vectoriales de puntos (acci-

dentos geográficos, ciudades, etc.), líneas (ríos, carreteras, etc.) y polígonos (unidades de fotointerpretación, distritos, etc.). En las bases de datos relacionales se ingresó toda la información disponible para cada punto, cada línea y cada polígono. Se construyeron 19 capas temáticas que pueden superponerse de acuerdo con los requerimientos del usuario. El programa permite realizar operaciones, como clasificar atributos, calcular distancias entre objetos, visualizar categorías seleccionadas, calcular las superficies y cantidad de unidades de categorías seleccionadas, visualizar los vectores de información de cada unidad cartografiada (Fig. 1).

dos cubren los suelos fértiles y colman los cursos de agua. Se evaluó el riesgo de erosión para identificar los sitios en que debían aplicarse medidas de protección de los bosques (Matteucci, Colma, Pla, 1982).

La erosión es función del grado de pendiente, el porcentaje de cobertura vegetal, el tipo de vegetación, la altitud, la precipitación y las propiedades físicas del suelo. Los dos últimos factores no fueron considerados por resultar espacialmente homogéneos a la escala del estudio. Se diseñó una ecuación matemática para describir el efecto de los factores restantes ponderados según su importancia.


La información, que provino del estudio del ejemplo anterior, se encontraba en soporte analógico y se geocodificó manualmente. Sobre los mapas temáticos se dispuso una grilla de celdas de $1,6 \times 1,6 \text{ cm}^2$ y a cada una de ellas se le asignó la categoría correspondiente del atributo analizado. La cartografía original estaba a una escala de 1:250.000, de modo que la resolución fue de $4 \times 4 \text{ km}^2$. Las matrices numéricas se ingresaron en una base de datos, a partir de la cual se generaron los mapas *raster* de cada atributo. El tratamiento de los datos consistió en resolver la ecuación mediante operaciones matemáticas matriciales, y producir una nueva matriz con el resultado (Fig. 2).

Cartografía de los procesos ecológicos de un bosque a escala de cuenca

Una de las ventajas importantes del SIG es que permite combinar tecnologías. El ejemplo que sigue muestra la aplicación combinada del procesamiento de imágenes satelitales, los modelos de simulación y el SIG para el estudio del funcionamiento de una cuenca (Running et al., 1989).

Los AVHRR (radiómetros avanzados de muy alta resolución) a bordo de los satélites NOAA proveen información diaria con una resolución espacial de 1,1 km. A partir de la reflectancia en las longitudes de onda infrarroja y roja se calcula el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), que es un estimador del índice de área foliar (IAF=superficie total de las hojas por unidad de super-



Figura 1: se muestra, a modo de ejemplo, una de las capas temáticas: la de Unidades Fisionómicas (nivel jerárquico inferior del sistema de clasificación de la tierra) y los resultados que se pueden obtener mediante una clasificación y una identificación. La clasificación se realizó sobre la base del campo que almacena los grupos estructurales primarios de la vegetación (nivel jerárquico superior del sistema de clasificación de la vegetación). Para la identificación, se pisó con la herramienta  el polígono cuya información se desea conocer, con lo cual se despliega la tabla en la que se listan todos los atributos incluidos en la base de datos relacional.

Fuente: Matteucci, Colma, Pla, 2001

La información original no se modificó, su calidad sigue siendo la misma, pero sin duda el SIG la potencia, al permitir realizar nuevas combinaciones de manera rápida y confiable. También simplifica considerablemente su actualización.

Manejo de recursos en relieves montañosos

En los relieves montañosos existe riesgo de erosión. En el noroeste de Venezuela, las lluvias torrenciales y el manejo inadecuado de la vegetación causan daños importantes que afectan no sólo a los relieves erosivos, sino también a las tierras bajas, donde los materiales arrastra-

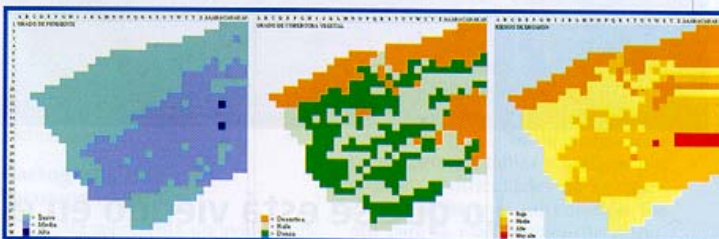


Figura 2: las dos primeras capas, Grado de Pendiente y Grado de Cobertura Vegetal, tienen tres categorías cada una (alta, media, baja y desértica, rara, densa, respectivamente). La tercera capa, Riesgo de Erosión, es el resultado de la ecuación $E = f(S, C, H, A)$, donde E=riesgo de erosión; S=pendiente; C=cobertura de la vegetación; H=altitud; A=estructura vertical de la vegetación. El cálculo es matricial, un pixel identificado por las coordenadas letra/número de cada una de las 4 capas entra en la ecuación para dar el valor de E en dicho pixel.

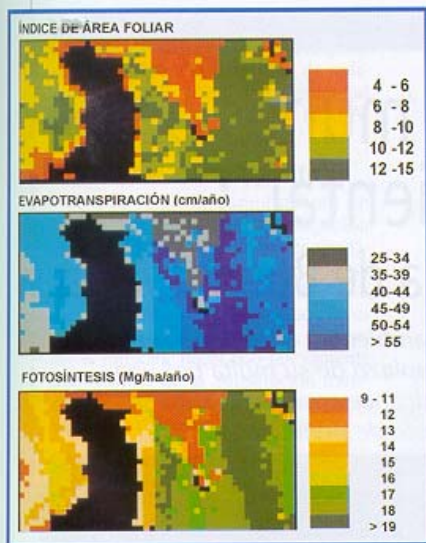


Figura 3: representación raster del Índice de Área Foliar, la evapotranspiración anual y la fotosíntesis anual en un territorio montañoso ocupado por bosques de coníferas en el oeste de Montana, USA. Las franjas de píxeles negros que atraviesan las tres capas de norte a sur corresponden a la superficie ocupada por el lago Flathead, en el cual no existe vegetación terrestre y por lo tanto el IAF es cero, al igual que otras variables que dependen de la presencia de las hojas. Con esta combinación de tecnologías es posible predecir cómo se modificaría el régimen hidrológico de la cuenca, la producción de madera, etcétera, si se talaran ciertas porciones del bosque en ubicaciones particulares. Fuente: modificado de Running et al., 1989.

entrada del modelo de simulación Biome-BGC (Ciclos BioGeoquímicos de Biomasa), junto con datos climáticos, topográficos, edáficos, microclimáticos y vegetacionales. Los datos climáticos diarios se obtienen para cada píxel con sensores remotos o en tierra. El modelo, que permite hacer un cálculo diario de fotosíntesis y evapotranspiración, lleva casi tres décadas de desarrollo, durante las cuales se han ido agregando módulos que amplían su potencial. Inicialmente, el modelo se podía aplicar a territorios reducidos, en condiciones físico-bióticas espacialmente homogéneas. El desarrollo de los SIG permite integrar los resultados del modelo aplicado a cada píxel, el IAF y los datos climáticos. Las estimaciones a nivel regional de fotosíntesis y evapotranspiración (Fig. 3) no hubiesen sido posibles sin el desarrollo del SIG y la combinación de las tres tecnologías.

La tecnología SIG, combinada con el procesamiento de imágenes, se está empleando en nuestro país para dar respuesta a una gran variedad de pre-

(Continúa en página 996)

ficie de suelo). Este dato es una variable clave para el funcionamiento del ecosistema, ya que el intercambio energético, de gases y de vapor de agua entre la vegetación y la atmósfera ocurre a través de las hojas y de-

pende de sus propiedades. Con esta técnica de procesamiento y la calibración a campo, se obtiene una matriz raster en cada una de cuyas celdas hay un valor de IAF (Fig. 3).

El IAF es una de las variables de



L.R. Ambiental S.A.

LABORATORIO DE ANÁLISIS INDUSTRIALES
CONSULTORÍA AMBIENTAL

Autorizado por la Secretaría de Política Ambiental
de la Provincia de Buenos Aires

Registro N° 003

Ramón Falcón 2534
(1406) C. A. de Buenos Aires

Tele/fax: 4637-5434 / 5787-0838/0839
e-mail: info@LRambiental.com.ar
www.lrambiental.com.ar

Sistemas de información geográfica (SIG) como herramienta para el análisis del medio ambiente

(Viene de página 923)

guntas a diversas escalas. Los estudios van desde el nivel de finca hasta el regional; incluyendo descripciones de la distribución de recursos y clasificación de ecosistemas o su evolución en el tiempo, hasta la dinámica de la erosión, o la evaluación de riesgos de incendios o inundaciones, por mencionar algunos ejemplos (Selper, 2000).

Implementación de la tecnología SIG

La implementación de un SIG, tanto en un organismo de administración como de enseñanza, puede ser considerada una acción a mediano o largo plazo, y tiene una relación muy estrecha con el tipo de tarea que se debe realizar y los resultados a los que se desea arribar. La sola compra de un sistema (*hardware* y *software*) no agota el tema y no garantiza el buen desempeño; se deben considerar, siguiendo a Buzai (2000), otras cuestiones, entre las cuales se destacan:

- Identificación de las necesidades. Es una tarea básica para implementar la tecnología SIG y definir cuáles de los recursos posibles son los más adecuados. En esta etapa se define un esquema conceptual que identifica el trabajo al cual será aplicado sobre la base de las cinco capacidades del SIG (Camara, 1993): presentación cartográfica, análisis espacial, tratamiento de redes, modelado numérico de terreno y procesamiento digital de imágenes.
- Análisis de la institución: se realiza un inventario de los recursos disponibles, ya sea en equipamiento como en capacitación de personal para no caer en superposiciones en la asignación de recursos (Campbell y Masser, 1995). Es importante que los usuarios conozcan la diferencia entre un SIG máximo y un SIG mínimo para evitar gasto innecesario de recursos financieros.
- Elección del sistema: se basa en el esquema conceptual, pues no todos los sistemas realizan tareas

con similar grado de eficacia. El SIG tiene que tener la capacidad para resolver las cuestiones para las cuales se lo necesita.

- Puesta en funcionamiento: conviene realizar un proyecto piloto en el cual se definen cuestiones de último momento y previas al funcionamiento total (NCGIA, 1990), y luego, contando con bases seguras, se ejecuta el proyecto definitivo, en el cual el sistema queda operacional (Buzai y Baxendale, 1997).

Consideraciones finales

Existen dos razones que justifiquen la implementación de un SIG: a) la necesidad de incrementar la exactitud y la rapidez de ejecución; b) la carencia de otros métodos para realizar una tarea.

Sólo a partir de su utilización en trabajos concretos se pueden evaluar las verdaderas aptitudes de un SIG. Los folletos explicativos de las empresas proveedoras de *software* y la opinión de vendedores interesados pueden magnificar sus verdaderas aptitudes.

Cuando se espera más de lo que el sistema puede brindar se sufren desilusiones, por lo tanto la fase de implementación surge como punto clave.

En síntesis, la utilización de un SIG no puede ser conceptualizada únicamente a partir de cuestiones tecnológicas, por lo cual los múltiples factores que intervienen en su correcto uso lo convierten en una herramienta de gran complejidad. Sin esta tecnología sería prácticamente imposible encarar los problemas ambientales actuales, de carácter global y multiescala. ▲

Bibliografía

- Buzai, G.D. 1992. Geoinformática: Teoría y aplicación. Anales de la Sociedad Argentina de Estudios Geográficos 19: 11-17.
- Buzai, G.D. 2000. La exploración geodigital. Lugar Editorial, Buenos Aires.
- Buzai, G.D.; C.A.Baxendale. 1997. Necesidad y características de la realización de un proyecto piloto como prototipo de la realidad. En: Dirección de Educación Media, Técnica y Agraria de la provincia de Buenos Aires. Síntesis Diagnóstica (Anexo 1), La Plata.
- Camara, G. 1994. Anatomía de un SIG. Fator GIS 1(4): 11-15.
- Campbell, H.; L.Masser. 1995. GIS and Organizations. Taylor & Francis, London.
- Cebrían, J.A. 1988. Sistemas de Información Geográfica. En: J.Bosque et al. Aplicaciones de la informática

a la geografía y ciencias sociales. Síntesis, Madrid.

- Crosbie, P. 1993. Reality of Object-oriented GIS. Proceedings of the Urban and Regional Information Systems Association 1: 188-199.
- Davies, C.A.; K.A.Vasconcelos Borges. 1994. GIS orientado a objetos na prática. Anais GIS Brasil 94. Sagres Editora, Curitiba. Pp. 18-28.
- Dyer, C.R. 1982. The space efficiency of quadrees. Computer Graphics and Image Processing 19: 335-348.
- Goodchild, M.F. 1990. GIS and basic research: the National Center for Geographic Information and Analysis. NCGIA, Santa Barbara.
- Marble, D. 1990. Geographic Information Systems. An overview. En: D.Marble and D.Peuquet (Eds.) Introductory readings in Geographic Information Systems. Taylor & Francis, London. Pág. 8-17.
- Matteucci, S.D.; A.Colma; L.Pla. 1982. Desertification maps of Falcon Sate. Environmental Conservation 9(3): 1-8.
- Matteucci, S.D.; A.Colma y L.Pla. 1985. Multiple purposes land mapping and resources inventory. Environmental Management 9(3): 231-242.
- Morain, S.; S.López Barros (Eds.) 1996. Raster imagery in Geographic Information Systems. OnWord Press, New York.
- NCGIA, 1990. Core Curriculum. National Center for Geographic Information and Analysis, Santa Barbara.
- Pivetta, R.G. 1990. Equipamentos para geoprocessamento. Anais I Simposio Brasileiro de Geoprocessamento. Escola Politécnica-USP, Sao Paulo. Pág. 79-87.
- Running, S.W.; R.R.Nemani; D.Peterson; L.E.Band; D.F.Pottes; L.L.Pierce; M.A.Spanner. 1989. Mapping regional forest evapotranspiration and photosynthesis by coupling satellite data with ecosystem simulation. Ecology 70(4): 1090-1101.
- Selper, 2000. Sociedad de Especialistas Latinoamericanos en Percepción Remota. IX Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, Puerto Iguazú, Argentina. www.selper.freeservers.com/selper/programa-detallado.htm
- Strauch, J.C.M.; M.L.Queirós Mattoso. 1997. Orientação a Objetos aplicada aos GIS. Fator GIS 5(20): 58-60.
- Wadsworth, R.; J.Treweek. 1999. Geographical Information Systems for ecology. An Introduction. Addison Wesley Longman Ltd., Singapore.
- Worboys, M.F.; H.M.Hearnshaw; D.J.Maguire (1990) Object-oriented data modeling for spatial databases. International Journal of Geographic Information Systems 4(4): 369-383.

Gustavo D. Buzai es profesional principal del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet), Grupo de Ecología del Paisaje, Centro de Estudios Avanzados, Universidad de Buenos Aires (UBA). Silvia D. Matteucci es investigadora independiente del Conicet, Grupo de Ecología del Paisaje, Centro de Estudios Avanzados, UBA.