

Respuesta Espectral de la vegetación quemada para distintos Ecosistemas de la Argentina

Mari, Nicolás¹; Di Bella, Carlos¹; Fischer, María de los Angeles¹; Ferrer, Francisco¹
Kanpandegi, Jon Ander¹⁻²

¹ Instituto de Clima y Agua, INTA Castelar
Los Reseros y las Cabañas s/n C/P 1712, Castelar, provincia de Buenos Aires, ARGENTINA

² Universidad de Alcalá de Henares

Calle Colegios 2, 28801 Alcalá de Henares, ESPAÑA
nmari@cnia.inta.gov.ar, cdibella@cnia.inta.gov.ar, afischer@cnia.inta.gov.ar,
escribileapaco@gmail.com, jkanpan@gmail.com

RESUMEN

La regeneración de la vegetación post fuego es un proceso dinámico dependiente de diversos factores como el clima, la topografía y el tipo de vegetación. En este trabajo, se exploraron las tendencias regenerativas de distintos tipos de vegetación (Bosques, Pastizales y Arbustales) de la Argentina, en un amplio gradiente eco regional para el periodo 2003-2006. La regeneración se evaluó a partir del cociente de NDVI entre el sitio quemado y el sitio control (QNDVI). Resultados preliminares indican por un lado, que los ambientes boscosos sometidos a incendios más severos están condicionados a un menor desarrollo fotosintético y mayores tiempos de recuperación. Mientras que los pastizales presentaron mayores niveles de recuperación fotosintética en menor tiempo.

Palabras Clave: Post Fuego, NDVI, Regeneración

ABSTRACT

Post fire plant regeneration dynamics is influenced by several factors such as climate, topography and vegetation types. In this work we explored the regeneration trends upon different environments (Woodlands, grasslands and shrublands) from Argentina in a wide ecoregional gradient for the period 2003-2006. The regeneration trend was measured from a quotient between the burned site and the control plots (QNDVI). Preliminary results indicate that woodlands ecosystems exposed to high fire severity levels are conditioned to a lower photosintetic development and a longer recuperation time. Meanwhile, Open Grasslands presented higher and faster regeneration levels.

Keywords: Post Fire, NDVI, Regeneration

Introducción

En general, muchos de los efectos del fuego sobre la vegetación pueden ser interpretados a partir de una visión integral de los atributos que comprenden al régimen de fuegos de un ecosistema en particular; sea la frecuencia, el tamaño, la intensidad, la severidad, la temporada

o el tipo de fuegos. Tales atributos, hacen en definitiva al comportamiento del fuego, y están controlados por las condiciones ambientales donde suceden, como el tipo y carga de combustibles, la topografía y el efecto de las condiciones meteorológicas.

Desde un punto de vista más acotado, el fuego produce cambios estructurales en la vegetación con distintos grados de severidad, principalmente dañando la parte aérea de las plantas y en algunos casos también la parte subterránea. El grado de daño es variable de acuerdo con las distintas formas de vida comprometidas, la intensidad del fuego y con el tiempo de exposición (Díaz-Delgado, Lloret y Pons 2003),

Los principales efectos del fuego en la vegetación son, en el corto y mediano plazo, la disminución de la capacidad fotosintética (fijación de CO₂ y liberación de O₂) y la pérdida de cobertura verde, produciendo por un lado, la alteración del flujo de intercambio de materia y energía entre el sistema tierra – atmósfera, y por otro, modificando las características hidrológicas a nivel del suelo, haciéndolos más susceptibles a la erosión (Menaut *et al.*, 1993).

Los efectos de largo plazo son perceptibles a mayores escalas espaciales, observándose cambios estructurales a nivel de paisaje, principalmente a partir del reemplazo de coberturas de bosques por pastizales y arbustales, dando lugar al avance de especies herbáceas en reemplazo de especies leñosas (Rostagno, *et al.*, 2006).

Como consecuencia de las causas y los efectos del fuego sobre un ecosistema en particular, las especies vegetales despliegan su capacidad de supervivencia mediante distintas estrategias de regeneración que les permitirán evolucionar o involucionar tras el paso del fuego. Habiendo especies que tienen la capacidad de rebrotar a partir de los restos no calcinados del tallo o la raíz (estrategia de rebrote), y otras especies que basan su regeneración en la dispersión masiva de semillas durante el incendio (estrategia de semillación), donde cada especie tiene un alcance o distancia de dispersión particular.

De este modo la resistencia desarrollada de determinadas especies para sobrevivir al fuego, representa un síndrome adaptativo ajustado al pulso del régimen de fuegos característico del ambiente donde habitan (Bravo *et al.*, 2003).

Los factores ambientales que influyen al proceso de recuperación de la vegetación son numerosos, e incluyen entre otros, a las temperaturas, precipitaciones, humedad, tipo de suelo, topografía, presencia de herbívoros, entre otros. A modo de simplificación, para evaluar estos factores, consideramos que una porción significativa de los mismos son englobados bajo el concepto de eco-región, que ilustra en forma general como se comportan los valores de es

tas variables en distintas regiones del territorio.

Tal vez el factor antrópico más importante que afecte a la regeneración vegetal de un área natural sometida por el fuego, sea la posterior agri-culturización de la misma, mediante el reemplazo sistemático de la vegetación natural por cultivos ó pasturas ganaderas.

En la Argentina, los trabajos realizados para el estudio de la vegetación post fuego, son por lo general realizados a nivel de parcela, habiendo pocas experiencias enfocadas hacia la caracterización regional de las tendencias y procesos de regeneración.

La Teledetección es una herramienta muy importante dentro de las aplicaciones enfocadas al seguimiento de la vegetación y el monitoreo de incendios, ya que puede ser utilizada para trazar a través del tiempo las trayectorias de recuperación de la cobertura verde de distintos tipos de vegetación afectados por fuego en forma simultánea. A partir de la utilización de índices espectrales diseñados para la detección de incendios como también para el seguimiento de la vegetación se hace posible interpretar la evolución de distintos tipos de coberturas de acuerdo a su ubicación, al ambiente al que pertenece y a las condiciones de uso y manejo del territorio.

A partir de las posibilidades que ofrece esta herramienta vinculada a un Sistema de Información Geográfica (SIG), se estableció como objetivo de nuestro trabajo, analizar: 1) las diferencias de recuperación de cobertura verde para distintos tipos de vegetación afectados por fuego, 2) las diferencias en el tiempo de recuperación, y 3) analizar algunos atributos del régimen de fuegos como la severidad en relación a la recuperación del verdor fotosintético y el tiempo de regeneración.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El área de estudio se comprende dentro de los límites definidos por una transecta trazada en dirección NE-SO abarcando las eco-regiones de Chaco seco, Chaco húmedo, Espinal, Monte y Selva de Yungas de Argentina (Fig. 1).

El fuego ha sido históricamente un elemento común dentro de estas regiones, interviniendo como modelador de la fisonomía y estructura de la vegetación, y como impulsor de los procesos actuales de cambio.

Las causas comúnmente asociadas al uso actual del fuego, están relacionadas a los cam-

bios en el uso del suelo promovido por el avance de la frontera agrícola y las actividades ganaderas, para lo cual se utiliza al fuego como herramienta para la remoción de especies leñosas (en prácticas de deforestación) y para el mejoramiento de la calidad de especies forrajeras respectivamente. Otro aspecto relevante está relacionado a la ocurrencia de incendios en zonas naturales, generalmente zonas turísticas, cuyas causas están asociadas a la negligencia de los habitantes.

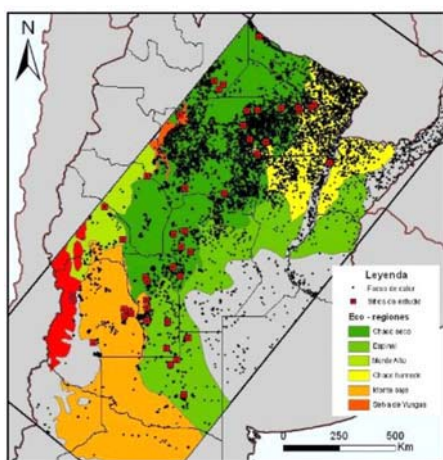


Fig. 1. En colores se representan las unidades eco-regionales dentro de los límites de la transecta estudiada. La ocurrencia de fuegos está representada en puntos negros, y las áreas de interés utilizadas, en cuadrantes rojos.

Información satelital y complementaria

Se utilizaron compuestos multi-temporales de NDVI de 16 días, e información espectral de las bandas del Red (rojo) (620-670nm), NIR (infrarrojo cercano) (841-876 nm) y SWIR (infrarrojo cercano de onda corta) (459-479 nm) extraídos de imágenes MODIS/terra de 1000m de resolución espacial (MOD13A1-V4) <http://LPDAAC.usgs.gov>. La información espectral se recopiló en una base de datos a partir del año 2003 hasta fines del 2006.

La localización espacial de los fuegos se llevó a cabo a partir de datos de focos de calor detectados por MODIS/aqua/terra, disponibles en www.conae.gov.ar. Los focos de calor representan una anomalía en la temperatura de la

superficie en un punto geográfico. Su detección se logra a partir de un algoritmo contextual (Giglio *et al.*, 2003) que explota la fuerte radiación emisiva generada por los fuegos en las bandas del infrarrojo medio (Dozier 1981, Matzon and Dozier 1981).

Posterior a la localización de los fuegos, se delimitaron visualmente los perímetros quemados utilizando la información espectral de las bandas SWIR, MIR Y RED. La combinación de estas bandas permite realizar la respuesta de la vegetación quemada, logrando detectarse los límites entre zonas afectadas y no afectadas por fuego (Chuvieco *et al.*, 2002)

Los tipos de vegetación y usos del suelo fueron identificados a partir del mapa de vegetación GLC 2000 (Eva *et al.*, 2004). La caracterización topográfica de los sitios quemados se realizó a partir de un modelo digital de terreno (SRTM 90). Para la delimitación de las unidades eco-regionales, se utilizó como referencia el mapa producido por Olson *et al.*, 2001. Finalmente, la información espectral, los focos de calor y la cartografía de vegetación, fueron integrados a un Sistema de información Geográfica (SIG).

Evaluación post fuego

Extracción y análisis de datos:

Se seleccionaron 46 incendios mayores a 900 ha ocurridos en la primavera del año 2003 dentro de los límites de la transecta definida y abarcando la mayor cantidad posible de eco-regiones. Para cada sitio quemado se ubicó un sitio control adyacente no quemado a no más de 3 km de distancia, que tuviera el mismo tipo de vegetación y localizado en similares condiciones topográficas.

Se extrajo información de NDVI para cada sitio dentro del periodo comprendido entre la primavera del 2003 y agosto del 2006, utilizando ventanas de 3 x 3 píxeles. Los valores de NDVI extraídos para cada fecha fueron promediados para luego ser integrados a lo largo del periodo de estudio.

Los principales tipos de vegetación afectados por fuego fueron arbustales abiertos y cerrados, pastizales abiertos, bosques caducos y bosques húmedos.

Se analizó la paridad fenológica de cada sitio quemado respecto de su sitio control. Para ello se utilizaron los datos acumulados de NDVI de 9 meses previos al fuego, con los cuales se realizó un «Student test» ($p > 0.01$) (Tabla 1). De aquí, se eliminaron los sitios que presentaban

diferencias significativas respecto a su correspondiente control.

De este modo se asumió una equidad fenológica entre sitios quemados y sus controles, de tal forma de poder trazar una trayectoria temporal comparable de la vegetación en la fase post fuego.

Del total de sitios seleccionados, finalmente se distinguieron 15 sitios que cumplieron con las condiciones de paridad.

Tabla 1: Valores Medios para los sitios estudiados en la fase pre fuego con sus correspondientes valores de significancia.

Sitio	Mean Fuego	Mean Control	p value
1	6.0659	6.1939	0.1109
2	6.6195	6.5581	0.4464
3	6.7035	6.2605	0.0002
4	10.8101	9.2160	0.0003
5	6.0473	5.0851	0.0025
6	9.2341	10.6544	0.0170
7	6.3114	6.2780	0.6278
8	10.3243	9.1205	0.0016
9	8.9643	8.4385	0.0601
10	8.9100	8.8151	0.7260
11	7.8197	7.8695	0.8370
12	5.9383	5.2412	0.0311
13	6.4424	5.6631	0.0001
14	8.7024	7.7269	0.0001
15	7.8029	7.4838	0.0811
16	7.9053	7.4691	0.0378
17	9.2534	8.4773	0.0000
18	7.3645	6.9972	0.1028
19	6.6481	6.8304	0.1669
20	8.5236	6.7463	0.0000
21	7.4486	7.6254	0.3558
22	9.3259	7.5759	0.0000
23	9.7038	8.8813	0.0012
24	13.5911	11.3838	0.0248
25	11.1183	9.2264	0.0000
26	10.1465	7.7038	0.0000
27	12.5407	12.6420	0.6983
28	11.8304	11.8682	0.8194
29	10.0358	9.7973	0.5151
30	9.6931	10.3181	0.1089
31	11.8818	12.4825	0.3340
32	17.3048	10.6973	0.3515
33	10.3800	10.3766	0.9427
34	11.9275	12.4486	0.0000
35	10.1416	10.4540	0.0031
36	11.6598	12.2203	0.0017
37	14.6147	12.6042	0.0004
38	10.0414	11.3554	0.0001
39	9.2454	10.0696	0.0557
40	11.3791	11.6928	0.2458
41	12.1201	11.2182	0.1080
42	10.6957	11.2078	0.1090
43	10.2789	11.2657	0.0016
44	11.9906	10.8948	0.0001
45	13.6405	13.1184	0.2240
46	10.0743	10.5910	0.2875

tiendo una interpretación directa sobre la capacidad de recuperación fotosintética de los tipos de vegetación afectados por fuego, en comparación con sus controles.

$$QNDVI = \frac{AverageNDVI_{fire}}{AverageNDVI_{control}} \quad (1)$$

De este modo, se utilizaron los valores apareados de NDVI de cada sitio para calcular el QNDVI fecha a fecha, y luego relacionarlo con los distintos tipos de vegetación.

Tiempos de regeneración post fuego:

Sobre los 15 sitios elegidos, se realizó una serie de comparaciones multi-temporales entre los valores de NDVI de sitios quemados y controles (*Student test* $p < 0.01$) (Fig. 2). Cuando los valores de NDVI de un sitio quemado no mostraban diferencias significativas en comparación a su sitio control en una fecha en particular, y este comportamiento se trasladaba a las siguientes fechas, se asumió como un indicador de la recuperación de la actividad fotosintética de la vegetación a su estado «normal» de funcionamiento.

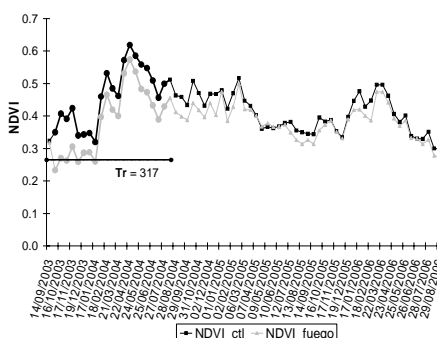


Fig. 2: En trazos gruesos se representa la trayectoria de los sitios comparados con diferencias significativas. En trazos finos, la continuidad de la trayectoria con diferencias no significativas.

Recuperación del verdor de áreas quemadas

Las diferencias espectrales entre sitios quemados y control fueron medidas a partir del índice QNDVI propuesto por Díaz-Delgado *et al.*, 2001 (ecuación 1). De acuerdo con este autor, el índice apunta a minimizar las variaciones fenológicas entre los sitios comparados, permiti-

endo una interpretación directa sobre la capacidad de recuperación fotosintética de los tipos de vegetación afectados por fuego, en comparación con sus controles.

Análisis de Severidad

Los cambios estructurales y fenológicos que sufre la vegetación por el impacto del fuego, son

posibles de interpretar a partir de la diferencia del índice QNDVI entre la fecha previa y posterior al fuego (ecuación 2). Ésta medida ha sido denominada como «Damage ó Daño» y puede ser interpretada como un parámetro indirecto de la magnitud de la mortalidad de la vegetación por efecto del fuego (Díaz-Delgado *et al.*, 2001).

$$\text{Damage: } preQ_NDVI - postQ_NDVI \dots (2)$$

Los valores de Daño para cada sitio fueron categorizados en tres niveles: Bajo, Medio y Alto. Se relacionó cada nivel con la recuperación del verdor de los tipos de vegetación quemados y el tiempo de regeneración.

Resultados

Recuperación del verdor de áreas quemadas

Los arbustales abiertos y pastizales fueron las coberturas con mayor recuperación, seguidas por los arbustales cerrados. Los valores promedio más bajos de Q_{NDVI} fueron para bosques caducos y bosques húmedos. Como es de esperar, los valores más altos estuvieron asociados a especies herbáceas y leñosas finas, presentando una mayor capacidad de germinación y rebrote respectivamente. Los menores niveles de recuperación alcanzados por las coberturas leñosas, puede deberse por un lado al nivel de daño sufrido y al tipo de fuego comprometido, y por otro a la disponibilidad de recursos, condicionados por la continuidad vertical y horizontal de los combustibles (Fig. 3)

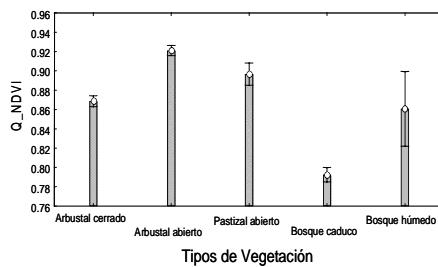


Fig. 3: Valores promedio del índice QNDVI para distintos tipos de vegetación afectados por fuego para todo el periodo de estudio.

Tiempos de regeneración post fuego

Se determinaron los días que le llevó a cada tipo de vegetación quemada recuperar su verdor fotosintético en comparación a su sitio control (Fig.4). Los menores tiempos alcanzados

fueron para pastizales abiertos, seguido de los arbustales. Los bosques caducos y húmedos por su parte, fueron los que mayor tiempo necesitaron para recuperar un verdor similar al de sus controles apareados.

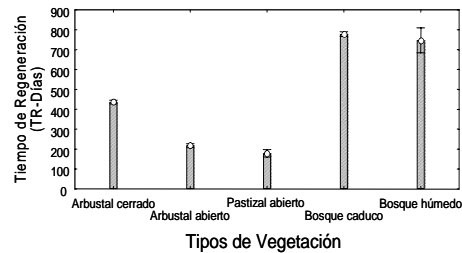


Fig. 4: Tiempos promedio de recuperación del verdor fotosintético para distintos tipos de vegetación para todo el periodo de estudio.

Análisis de Severidad

Los valores de severidad para cada tipo de vegetación fueron mayores para coberturas de especies leñosas dentro de los bosques caducos y arbustales cerrados. Para el caso de los bosques húmedos se observó que el nivel de daño fue el más bajo entre las clases, lo cual no se coincide con la respuesta esperable de este tipo de vegetación. Para el caso de los pastizales y arbustales abiertos el daño observado fue similar, no mostrando diferencias significativas entre ellos. La clase de bosques caducos representa el mayor grado de severidad (Fig.5).

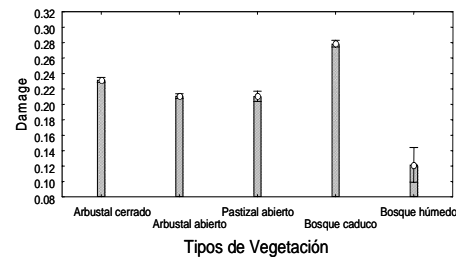


Fig. 5: Valores promedio de daño para distintos tipos de vegetación para todo el periodo de estudio.

Relación entre Daño, QNDVI y TR:

De acuerdo con los niveles de daño categorizados e independientemente del tipo de vegetación afectada, se los relacionó con QNDVI.

En la Figura 6 podemos observar que para mayores niveles de daño, menor es el índice Q_NDVI alcanzado, representando una menor recuperación del verdor fotosintético para situaciones de mayor daño.

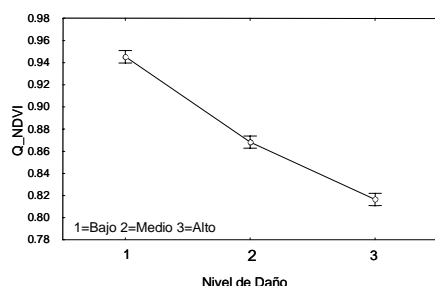


Fig. 6: Relación entre los niveles de daño y QNDVI para todos los tipos de vegetación afectados dentro de todo el periodo de estudio.

De modo similar, se relacionó el daño con el TR. El resultado indica que los niveles mayores de Daño están asociados a una recuperación más lenta en el tiempo, mientras que los niveles bajos de daño, el TR es significativamente menor (Fig. 7)

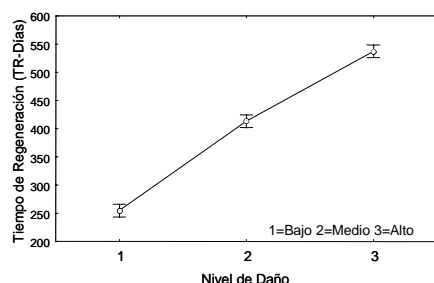


Fig. 7: Relación entre los niveles de daño y TR para todos los tipos de vegetación afectados dentro de todo el periodo de estudio.

Conclusiones

La aplicación del índice QNDVI para determinar la recuperación del verdor fotosintético de las áreas quemadas nos permitió discriminar las diferencias de crecimiento para distintos tipos de vegetación. Los arbustales y pastizales abiertos presentaron los mayores niveles de recupera-

ción, mientras que los bosques caducos y húmedos no alcanzaron a recuperarse dentro del periodo de estudio.

Estos resultados se refuerzan con los obtenidos a partir del cálculo de TR expresado en días, donde los tipos de vegetación con menores tiempos de regeneración fueron los pastizales y arbustales, mientras que los bosques presentaron niveles significativamente mayores.

Ambos resultados indicarían que el orden ascendente de recuperación está asociado a cada unidad fisonómica y su nivel de cobertura.

Así mismo éstos resultados se complementan con los resultados del análisis de severidad, puntualmente para el caso de los bosques caducos, los cuales presentaron menores niveles de QNDVI y un mayor TR.

De estas relaciones se demuestra que a mayores niveles de daño existe un efecto negativo sobre la recuperación fotosintética y el tiempo de regeneración, pudiendo establecerse que la ocurrencia de incendios más severos podrían retardar los procesos de regeneración de determinados tipos de vegetación.

Agradecimientos

Se agradece la ayuda del Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) CRN-2031 apoyado por la US National Science Foundation (Grant GEO-0452325).

Este trabajo fue financiado por INTA en el marco de los proyectos AERN 4 Y AERN4642. Se agradece a CONAE por el suministro de información de focos de calor.

Los datos MODIS utilizados en este trabajo son distribuidos por el «Land Processes Distributed Active Archive Center» (LP DAAC), ubicado en el U.S. Geological Survey (USGS) Center for Earth Resources Observation and Science (EROS) <http://LPDAAC.usgs.gov>.

Referencias

- CHUVIECO, E., MARTÍN, M.P. y PALACIOS, A. «Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination» *International Journal of Remote Sensing*, vol. 23, 2002, pp. 5103-5110.
- Díaz-Delgado R., Lloret F., and Pons X.2001. Influence of fire severity on plant regeneration by means of remote sensing imagery. *International journal of Remote Sensing*, Vol. 24, No.8, 1751-1763.
- Eva, H.D., Belward, A.S., De Miranda, E.E., Di Bella, C.M., Gond, V., Huber, O., Jones, S., Sgrenzaroli, M., Fritz, S. 2004. A land cover

- map of South America. *Global Change Biology*. 10, 1-14, Blackwell Publishing Ltd.
- Matson M. y Dossier J. (1981). Identification of subresolution high temperature sources using thermal IR sensor, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 47, 1311-1318
- Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C.O., Kaufman, Y. 2003. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 87:273-282.
- Menaut, J.C., L. Abbadie, E Lavenu, P. Loudjani & A. Podaire. 1993. Biomass burning in West African savannas. p. 133-142. *In* J. Levine (ed.). *Global biomass burning: Atmospheric, climatic and biospheric implications*. MIT. Cambridge. Massachusetts.
- Olson, D., Dinerstein, E., Wikramanayake, E., Burgess, N., Powell, G., Underwood, E., D'Amico, J., Itoua, I., Strand, H., Morrison, J., Loucks, C., Allnut, T., Ricketts, T. Hura, Y., Lamoreux, J., Wettengel, W., Hedao, P., Kassem, K. 2001. *Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth*. *BioScience*. Vol. 51 No. 11.