

Modelos espaciales de la dinámica de la vegetación en escenarios de cambio climático en el «Timberline» selva nublada - paramo de la vertiente norte de la Sierra Nevada de Mérida (Venezuela); escenario B1 y situación constante

W. Santaella¹

¹ Estudiante del Centro Regional en Ciencia y Tecnología Espacial para América Latina y el Caribe CRECTEAL. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais de Brasil INPE. Santa Maria do Sul, RS, Brasil.

Resumen

Durante las últimas décadas el humano ha modificado las concentraciones de gases invernadero, generando el aumento de la temperatura global, causando alteraciones en la estructura y distribución de animales y plantas. Se planteó modelar la dinámica de la vegetación bajo escenarios del informe especial sobre emisiones de gases de efecto invernadero IE-EE del Panel Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático IPCC. La metodología estuvo basada en análisis estadístico espacial del índice de vegetación por diferencia normalizada (NDVI) calculado con imágenes satelitales SPOT 5 y su relación con el gradiente altotérmico en el límite de crecimiento arbóreo continuo selva nublada - páramo «*Timberline*». Se determinó una disminución de la autocorrelación y un aumento de la varianza del NDVI a medida que se asciende sobre dicho gradiente. Se encontraron diferencias estadísticas entre los valores medios de NDVI ($p < 0,01$) de las unidades de vegetación, y aplicando análisis probabilístico se determinaron los rangos de NDVI para las mismas; selva nublada, bosque preparamero, arbustal preparamero y páramo, pudiendo modelar los cambios de la vegetación a lo largo del gradiente. Se encontró una fuerte correlación entre NDVI y temperatura ($r^2 = 90.45$), permitiendo generar una ecuación para modelar la respuesta de la vegetación al calentamiento global. Los modelos generados bajo diferentes escenarios, muestran una disminución del páramo tendiendo hacia la **extinción**, siendo colonizada por el arbustal preparamero y el bosque preparamero, las cuales evolucionarán posteriormente al estadio clímax de selva nublada. Los modelos muestran que existirán una serie de procesos evolutivos y de colonización reflejados con el cambio en la estructura de las plantas.

Palabras clave: calentamiento global, timberline, desplazamiento de vegetación, NDVI, evolución sucesional, modelos espaciales predictivos, selva nublada, páramo, extinción.

Abstract

Spatial models of dynamics of vegetation in scenerios of climatic change in «Timberline» cloud forest - paramo of north slope of the Sierra Nevada of Mérida - Venezuela; scenario B1 and constant situation

In recent decades, the human has changed the concentrations of greenhouse gases, generating increasing global temperature, causing changes in the structure and distribution of animals and

* Autor para la correspondencia: anibalduarte7@hotmail.com

Recibido: 01-10-12; Aceptado: 06-06-13.

plants. Modeling was raised vegetation dynamics under scenarios of the Special Report on Emissions of greenhouse gases SRES Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. The methodology was based on spatial statistical analysis of the rate of normalized difference vegetation index (NDVI) calculated from SPOT 5 satellite images and their relationship with the gradient thermal in the limit of continuous cloud forest tree growth - Páramo «*Timberline*». Was determined autocorrelation decreased and increased the variance of NDVI as it rises above the gradient. There were statistical differences between the mean values of NDVI ($p < 0.01$) of the vegetation units, and applying probabilistic analysis were determined NDVI ranges for them; cloud forest, pre (before) paramero forest, preparamero Shrub and páramo, can model changes of vegetation along the gradient. We found a strong correlation between NDVI and temperature ($r^2 = 90.45$), allowing to generate an equation to model the response of vegetation to global warming. The models generated under different scenarios show a decrease in the Páramo tending towards **extinction**, being colonized by preparamero shrub and preparamero forest, which subsequently evolve the climax stage of cloud forest. Models show that there will be developmental processes and recolonization with the change reflected in the structure of plants.

Key words: global warming, timberline, displacement of vegetation, NDVI, sucesional evolution, spatial predictive models, cloud forest, páramo, extinction.

Introducción

El sistema climático del planeta ha cambiado de manera importante desde la época preindustrial, la mayoría de estos cambios se pueden atribuir a las actividades humanas, siendo ésta situación inequívoca, ya que las mismas han hecho aumentar las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero y aerosoles en un 70% entre 1970 y 2004. Estos gases están atrapando una porción creciente de radiación infrarroja terrestre, generando un aumento del promedio de la temperatura mundial, entre 0,56-0,92°C en los últimos 100 años. Se espera que la temperatura aumentará 0,1°C por década si se mantienen constante las concentraciones de todos los gases y 0,2°C bajo otros escenarios del informe especial de emisiones (IE-EE - siglas en español) del Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC). Es muy probable (>90%) que la situación actual pueda estar generando días y noches más calidos con heladas menos frecuentes (IPCC 2007).

La temperatura es uno de los principales factores que limitan la distribución de las plantas afectando de manera determinante las funciones de supervivencia, reproducción o desarrollo (Wieser y Tausz, 2007; Graf, 1994; Pretinice *et al.*, 1992; Krebs, 1985; Sakay y Larcher, 1987). Los cambios en el clima pueden generar un desplazamiento de la vegetación alte-

rando los límites de existencia o distribución de las especies vegetales (grado de confianza muy alto) (IPCC, 2007), es decir los hábitats pueden desplazarse hacia altitudes mayores al responder las especies al calentamiento global (Holtmeier y Broll, 2007; Santaella, 2007; Klanderud *et al.*, 2003; Walther 2002, 2003; Corlett, 2002; Grace, 1989, 2002; Peñuelas *et al.*, 2002; Pauli *et al.*, 2001; Grabherr *et al.*, 1994, 1995, 2001; Keller *et al.*, 2000; Andresen *et al.*, 1996; Hofer, 1992).

Actualmente existe fuerte discusión ya que se espera que la zonas del «*treeline*» (Limite de crecimiento arbóreo discontinuo) y «*Timberline*» (limite de crecimiento arbóreo continuo) sufrirán alteraciones significativas debido al calentamiento global y los cambios en la composición química de la atmósfera (Santaella, 2007; Holtmeier and Broll, 2007; Walther *et al.*, 2005; Grace *et al.*, 2002; Wieser and Tausz, 2007).

El «*Timberline* y *Treeline*» son considerados como pieza clave para el entendimiento y monitoreo de los efectos del cambio climático sobre ecosistemas de montañas (Camarero *et al.*, 2000). Son descritos como fronteras biológica sensibles a los cambios climáticos globales pasados y recientes (Hansen *et al.*, 1992), debido a que pueden detectarse mas fácilmente cambios en la distribución de especies (Pauli, 2001; Risser, 1995; Harte and Shaw, 1995).

Entre los componentes estructurales de la vegetación, las hojas son las que mayor influencia tienen sobre el comportamiento espectral captado por un determinado sensor óptico.

Factores ambientales como la temperatura y la humedad tienen una marcada influencia sobre la fisionomía de las plantas, y a su vez sobre la estructura interna de las hojas, incluso entre individuos de una misma especie. Estos rasgos pueden ser estudiados a través de la respuesta espectral de las plantas en determinadas regiones del espectro electromagnético (Ponzoni y Shimabukuro, 2009).

Diferentes índices espectrales han sido propuestos para estimar la presencia, características o condiciones de la vegetación. Uno de los índices de vegetación más utilizados es el NDVI (índice de vegetación por diferencia normalizada), propuesto por (Rouse *et al.*, 1973) como un descriptor de la vegetación. Este relaciona algebraicamente la región de rojo, dada por la capacidad de absorción de radiación electromagnética que caracteriza la clorofila y la alta reflectividad en el rango del infrarrojo cercano generada por la estructura del mesófilo de la hoja. El mismo está fuertemente correlacionado con variables como el índice de área foliar, producción de biomasa y productividad primaria neta (Pettorelli *et al.*, 2005; Paruelo *et al.*, 1997; Myneni *et al.*, 1995; Running, 1990; Ripple, 1985; Sellers, 1985; Gerberman *et al.*, 1984; Asrar *et al.*, 1984; Baret *et al.*, 1989; Curran, 1983; Tucker, 1977). También ha sido utilizado para el desarrollo de modelos que reflejan la respuesta de la vegetación a variaciones climáticas (Wang *et al.*, 2003; Gong y Shi, 2003).

En los Andes existe un gradiente altotérmico donde la temperatura disminuye 0,61 °C por cada 100 metros de elevación (Röhl 1951; Monasterio, 1980), éste enfriamiento es conocido como adiabático, y es un factor determinante para la distribución de las diferentes formas de vida (Yáñez, 1998; Sarmiento, 1986; Baruch, 1984; Veillon, 1974). Así mismo influencia los procesos de desenvolvimiento fisiológico vegetal afectando las tasas de crecimiento (Cabrera 1996; Azócar y Rada, 1993; Austin y Smith, 1989) y limitando el establecimiento de especies cuya morfología y fisiología adapta-

tiva no les permite desarrollarse en áreas donde predominan bajas temperaturas con frecuentes heladas como es el páramo (Cabrera, 1996; Azócar y Rada, 1993; Slatyer y Noble, 1992; Sarmiento 1986).

En este sentido, se considera que probablemente el NDVI modelará de manera ajustada las complejas variaciones de la vegetación en la zona transicional Páramo - Selva Nublada. En el presente trabajo se plantea como objetivos determinar la existencia de posibles diferencias o similitudes del NDVI entre las unidades de vegetación y analizar su relación con la temperatura a lo largo del gradiente altotérmico. A través del análisis espacial se profundizará en el estudio de la temperatura como limitante del crecimiento arbóreo continuo «*timberline*» y los posibles efectos del calentamiento global sobre la vegetación. En este contexto se aplicarán métodos geoestadísticos y espaciales para modelar la posible dinámica de la vegetación bajo los incrementos de la temperatura media que proponen escenarios oficiales del informe especial de emisiones (IE-EE) del IPCC.

Metodología

Descripción del área de estudio

El área de estudio se ubica dentro de las coordenadas 8°34'36.5"N-71°07'27.41"W y 8°34'23.28"N-71°00'00.60"W y corresponde a la vertiente norte de la Sierra Nevada de Mérida (Venezuela), tiene una superficie de 44.169 ha y se encuentra localizada dentro del parque nacional Sierra Nevada, la cual tienen en su haber recursos biológicos de alta fragilidad, como las formaciones de páramo y selva nublada. Forma parte de uno de los dos ramales principales de los Andes de Venezuela, donde se localizan altitudes que sobrepasan los 4500 msnm (metros sobre el nivel del mar) (Pico Bolívar, Pico Humboldt, la Concha, Toro y Mucuñuque), (Shubert y Vivas, 1993).

Los registros pluviométricos para las tres estaciones (La Montaña, 2280 mm anuales; La Aguada, 1811 mm y Loma Redonda, 1553 mm) corresponden a un sector catalogado climato-

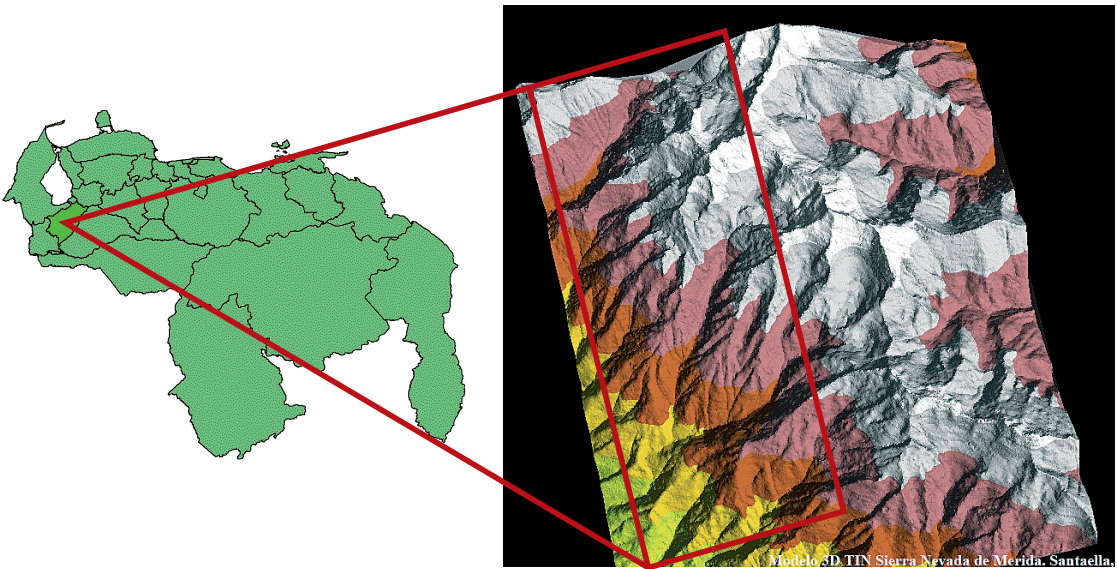


Figura 1. Ubicación relativa del área de estudio y modelo de red de triángulos irregulares (TIN) de la Sierra Nevada de Mérida (Santaella, 2007).

lógicamente como «Clima de Páramo Muy Húmedo» (Andressen *et la.*, 1996) y como el sector más húmedo de los Andes de Venezuela (Monasterio y Reyes, 1980).

Selva nublada y bosque preparamero

Las selvas nubladas son las formaciones de vegetación características de las regiones más elevadas de la franja tropical. Se encuentra ubicada entre los 1700 y 3000 msnm, y se caracteriza por presentar una distribución continua de árboles siempre verdes. Tienen una estratificación arbórea variada de composición mixta, con gran variedad en plantas epifitas y humedad relativa continuamente alta (Yáñez, 1998). Las temperaturas van desde los 9 a 14°C, con precipitación desde los 1000 a 3000 mm, sin meses secos, alta nubosidad, alta humedad relativa y baja insolación todo el año. Esta compuesta por más de 100 spp. de árboles con dosel muy irregular, entre 20-30 m en el límite inferior de distribución y hasta 10 m en el superior (Ataroff y Sarmiento, 2003). Este último corresponde al bosque preparamero y es donde las formas de vida arbórea probablemente comienzan a ser afectadas por la temperatura (Santaella, 2007).

Zona transicional (bosque preparamero)

Se ubica a los 3200 msnm, presentando una mezcla de elementos provenientes de zonas más bajas y zonas más altas, la cual origina una mayor riqueza de especies (Hansen, 1998, 1992). En la zona de transición se puede observar con más facilidad el avance de una unidad vegetal hacia otra formando islas o parches de vegetación (Yáñez, 1998). Esta zona transicional es denominada ecotono o ecoclina, dominado por arbustal enredado, cubierto por epifitas la cual crecen en manchones, rodeados de herbazales altos. En esta zona las condiciones existentes no favorecen el desarrollo de vegetación arbórea (Monasterio y Vuilleumier, 1986).

Páramo andino

Se ubica en vertientes secas a una altitud de 2700 a 4000 msnm, y en vertientes húmedas de 3000 a 4300 msnm. Presenta temperaturas de 7-10°C a 3°C, con precipitaciones que van desde los 800 a 1100 mm en vertientes secas, y desde los 1100 a 1800 mm en vertientes húmedas. Desde 0 a 3 meses secos con heladas restringidas en las épocas secas. La vegetación

esta compuesta por comunidades arbustivas y herbáceas, la más común tiene un estrato superior entre 50 y 150 cm con rosetas y arbustos, un estrato intermedio de arbustos y hierbas entre 20 y 50 cm y un estrato inferior con cojines y hierbas menores de 10 cm (Ataroff y Sarmiento, 2003).

Procesamiento y análisis de datos

Corrección geométrica

Se utilizó información espacial proveniente de un estudio realizado por (Santaella, 2007) correspondiente al área de estudio, la misma está conformada por ortofoto a escala 1:40000 de la misión A-34 del año 1952 corregido geoméricamente con un MDE (modelo digital de elevación) y 92 puntos de control (8 m de error), curvas de nivel a escala 1:25000 vectorizadas de los mapas topográficos 5941-I-SE y NE del instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar. Estos datos fueron utilizados para la elaboración del MDE a través de interpolación de contornos (Gorte *et al.*, 1990) y la posterior ortorrectificación (8 m de error equivalente a 0.8 píxel) de la imagen 651/333 del 11/01/2009 del sensor HRG (high resolution geometrical) de la plataforma satelital SPOT 5 (Système Pour l'Observation de la Terre) con nivel de preprocesamiento 1A y resolución espacial de 10 m.

Corrección radiométrica

Con el objetivo de poder elaborar cálculos con diferentes bandas de la imagen del sensor HRG de la plataforma satelital SPOT 5 la misma fue corregida radiométricamente convirtiendo los ND (números digitales) en valores físicos (Ponzoni y Shimabukuro, 2009), estos y otros autores catalogan como imprescindible realizar las transformaciones para un correcto análisis ya sea con imágenes CBER, LANDSAT, SPOT, entre otras. En este sentido los ND de la imagen SPOT 5 fueron transformados en radiancia bidireccional aparente y posterior-

mente en reflectividad en el tope de la atmósfera, siendo necesario algunos coeficientes de calibración del sensor y datos de las condiciones ambientales en las cuales la imagen fue generada, para ello fueron empleadas las siguientes ecuaciones (1 y 2):

$$L_{0\lambda} = DN_{\lambda} / A_{\lambda} \quad [1]$$

$$\rho\alpha = \frac{\pi \cdot L_0(\lambda) \cdot d^2}{E_{sun}(\lambda) \cdot \cos\theta} \quad [2]$$

Siendo:

$L_0(\lambda)$: Radiancia bidireccional aparente.

ND_{λ} : Número digital.

A_{λ} : Factor de calibración espectral.

d : Distancia del sol a la tierra en unidades astronómicas.

θ : Ángulo cenital solar.

$\rho\alpha$: Reflectividad aparente en el tope de la atmósfera.

$E_{sun}(\lambda)$: Irradiancia media del sol en el tope de la atmósfera ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$).

Las correcciones atmosféricas fueron obviadas debido a que no se realizarán comparaciones multitemporales o con datos radiométricos medidos in situ.

Cabe destacar que las bandas 2 y 3 del sensor HRG del SPOT 5 tienen igual resolución radiométrica.

Modelo digital de temperaturas medias anuales y corroboración del gradiente altotérmico

Para la producción del modelo digital de temperaturas medias del año 2008, se aplicó el método de gradiente altotérmico (Rohl, 1951) utilizando el MDE (altitud del sitio de temperatura desconocida en la ecuación 3) y datos de temperaturas máximas y mínimas diarias en intervalos de 60 minutos de la estación automática del proyecto MARS (Mérida *Atmospheric Research Station* figura), con los cuales se calculo la temperatura media para el año 2008 (temperatura conocida T_c en la ecuación 4). Este método fue utilizado por (Zhao *et al.*, 2010) en estudios recientes en China, para ello se aplicó el siguiente modelo matemático (3):

$$Tx = Tc + Gvm(\text{altitud}A - \text{Altitud}B) \quad [3]$$

Siendo:

Tx: Temperatura desconocida °C.

Tc: Temperatura conocida °C.

Gvm: Gradiente altotérmico °C/100m.

altitud A: Altitud del sitio de temperatura conocida en metros.

Altitud B: Altitud del sitio de temperatura desconocida en metros.

La Estación Meteorológica MARS se ubica en los predios de la Estación Pico Espejo del Teleférico de Mérida a 4765 msnm (altitud del sitio de temperatura conocida en la ecuación 3), dentro del Parque Nacional Sierra Nevada de Mérida. Es una estación automática que forma parte de un proyecto a nivel mundial. Este mismo consiste en la instalación de estaciones de monitoreo para observar y entender los cambios en los componentes de la estratosfera, la misma está a cargo del Instituto de Investigación de Meteorología y Clima y el Centro de Cálculo Científico de la Universidad de los Andes.

En ésta etapa se corroboró el gradiente altotérmico determinado por (Rohl, 1951) para la Sierra Nevada de Mérida (Venezuela) (0,61/100 msnm - *Gvm* en la ecuación 3). Esto se realizó a través de un análisis de regresión lineal entre

temperatura y altitud con datos de temperaturas medias anuales de 16 estaciones climatológicas pertenecientes al Ministerio del Ambiente y a la Universidad de los Andes, ubicadas en diferentes altitudes (Tabla 1 y Figura 2). El gradiente obtenido fue exactamente igual al calculado por (Rohl, 1951).

Análisis de autocorrelación y semivariograma de superficie

Para analizar la variación espacial del NDVI en el gradiente altotérmico se aplicó autocorrelación y semivariograma de superficie (ecuación 4 y 5), en éste procedimiento se analizó la relación, similitud o diferencia estadística del NDVI en cada píxel con respecto a sus vecinos en dirección vertical (gradiente altotérmico Norte-Sur), permitiendo analizar del NDVI en función de la distancia en la dirección del gradiente.

$$\text{AutoCorrelacion} = \frac{n \sum (a(p) * a(p+h)) - \sum a(p) * \sum a(p+h)}{\sqrt{\left\{ n \sum (a(p))^2 - (\sum a(p))^2 \right\} * \left\{ n \sum (a(p+h))^2 - (\sum a(p+h))^2 \right\}}} \quad [4]$$

$$\text{SemiVariograma} = \frac{\sum (a(p))^2 + \sum (a(p+h))^2 - 2 \sum (a(p) * a(p+h))}{2n} \quad [5]$$

Tabla 1. Muestra la distribución altitudinal, temperaturas medias y el serial de las estaciones utilizadas para comprobar el gradiente altotérmico, incluyendo la temperatura media del año 2008 calculada los con datos de la estación MARS

Estación	Altitud	T med. anual (°C)	Serial
El Vigia	130	27,9	3035
Las Bocas de Caparo	220	26,6	4086
Tovar	952	21,9	3141
La Azulita	1000	25,3	3135
San Juan Lagunillas	1050	22,5	3170
Mérida	1307	16,7	3050
Merida Aeropuerto	1470	19	3047
Canagua	1560	17,9	3134
Las Piedras	1657	16,7	3099
Santo Domingo	2155	15,6	3114
Hacienda el Carmen	2250	15,4	3168
La Cuchilla	2280	15,6	3040
Mucuruba	2320	14,6	3029
Los Plantios	2878	8,1	3161
Mucuchies	3100	11,3	3122
Mucubaji	3560	5,9	3072
Mérida Atmospheric Research Station	4765	-0,10	MARS

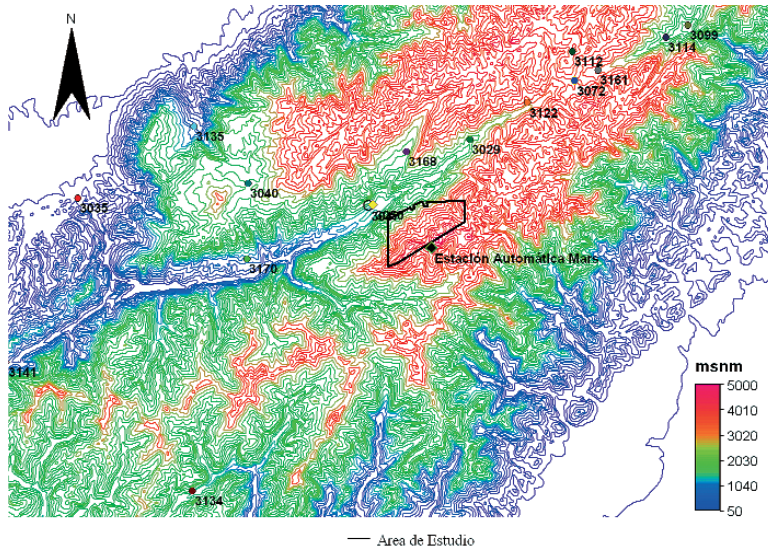


Figura 2. Muestra la distribución espacial de las estaciones climatológicas.

Siendo:

n : Número de términos en las adiciones.

$a(p)$: Valor de píxel en posición p en el mapa de entrada.

$a(p + h)$: Valor de píxel en posición $p+h$ en el mapa de entrada.

h : Píxel en dirección horizontal o vertical.

Cálculo y muestreo del índice de vegetación por diferencia normalizada NDVI

Con la imagen HRG-SPOT 5 y la ecuación 6, se calculó el NDVI (Rouse *et al.*, 1973) utilizando la banda 2 correspondiente al rango de longitud de onda del rojo (R) y la banda 3 correspondiente a la región del infrarrojo próximo (NIR) del espectro electromagnético, ambas con resolución espacial de 10 m.

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \quad [6]$$

Para determinar las posibles diferencias del NDVI entre las unidades de vegetación, se ubicaron 24 parcelas de 40×40 m. (4 píxel \times 4 píxel) en áreas homogéneas representativas de cada unidad de vegetación (96 parcelas en total equivalentes a 15,36 ha. muestreadas), reconocidas en campo y cuyos rangos altitudinales fueron estudiados por (Yáñez, 1998) en

una transecta de 1240 m de longitud por 2 m de ancho, ubicada entre 2850 y 3600 msnm. Así mismos se utilizó el MDE y el análisis de autocorrelación y semivariograma de superficies para decidir los rangos establecimiento latitudinal de las mismas por unidad de vegetación. Para determinar la existencia de grupos homogéneos y diferencias estadísticas del NDVI, se aplicó análisis ANOVA y prueba de rangos múltiples de Tukey.

Determinación de los rangos del NDVI de las unidades de vegetación

Para determinar los rangos del NDVI para las unidades de vegetación se aplicó un análisis de la máxima probabilidad que tiene un determinado valor NDVI pertenecer a una unidad de vegetación. Este análisis se realizó con los muestreos de las 96 parcelas.

Relación entre NDVI y temperatura

Para determinar la posible relación existente entre el NDVI y la temperatura, se ubicaron 200 puntos aleatorios de muestreo a lo largo del gradiente altotérmico y posteriormente se aplicó el modelo de regresión lineal, permitiendo determinar la relación entre las dos variables y prever el comportamiento del NDVI

Tabla 2. Proyecciones del promedio mundial del calentamiento en la superficie bajo diferentes escenarios (IPCC, 2007)

Caso	Cambio de temperatura (°C en 2090-2099 respecto de 1980-1999) ^{a,d}	
	Estimación óptima	Intervalo probable
Concentración constante en los niveles del año 2000 ^b	0,6	0,3-0,9
Escenario B1	1,8	1,1-2,9
Escenario A1T	2,4	1,4-3,8
Escenario B2	2,4	1,4-3,8
Escenario A1B	2,8	1,7-4,4
Escenario A2	3,4	2,0-5,4
Escenario A1F1	4,0	2,4-6,4

^a Los valores de temperatura son estimaciones óptimas evaluadas, y los intervalos de incertidumbre probables se han obtenido de una jerarquía de modelos de complejidad variable y de limitaciones observacionales.

^b La composición constante en valores del año 2000 se ha obtenido de modelos de circulación general atmósfera-océano (MCGAO) únicamente.

^c Todos los escenarios precedentemente indicados son seis escenarios testimoniales IE-EE. Las concentraciones aproximadas de dióxido de carbono equivalente correspondientes al forzamiento radiativo computado por efecto de los GEI y aerosoles antropógenos en 2100 para los escenarios testimoniales ilustrativos B1, A1T, B2, A1B, A2 y A1F1 del IE-EE son 600, 700, 800, 850, 1250 y 1550 ppm, respectivamente.

^d Los cambios de temperatura están expresados en términos de diferencias respecto del período 1980-1999. Para expresar el cambio respecto del período 1850-1899 hay que añadir 0,5°C.

a través de la temperatura (Neter y Wasserman, 1974). Posteriormente con el modelo matemático ajustado y las estimaciones óptimas de temperaturas de los siete escenarios IE-EE (Tabla 2) se generaron los modelos de la dinámica de la vegetación bajo la influencia de los diferentes escenarios estudiados.

Sustracción de sombras, nubes y cuerpos de agua

Dentro de la zona en estudio, existen áreas de topografía compleja que generaban sombras en la imagen satelital afectando la respuesta espectral de dichas áreas, las mismas fueron sustraídas del análisis espacial, para lo cual se aplicó clasificación supervisada utilizando el clasificador de mínimas distancias de Mahalanobis (Gorte, 1998). Para homogenizar las sombras se aplicó un majotity filter con un kernel 3×3 , luego aplicando algebra booleana se sustrajeron del análisis las áreas con sombras, es decir no fueron tomadas en cuenta para el estudio y son mostradas en los modelos como áreas blancas, igual método se aplicó para las nubes y cuerpos de agua.

Cálculo y distribución espacial de los posibles cambios que ocurrirán bajo los diferentes escenarios con respecto a la situación actual

Para determinar la distribución espacial y magnitud de los cambios en la vegetación se aplicó tabulación cruzada (CROSS), permitiendo analizar donde y en que proporción ocurrirán los cambios. Los mismos fueron representados en matrices de confusión donde cada fila de la matriz representa el número de predicciones de cada clase, mientras que cada columna representa a las instancias en la clase actual. Muestran en que proporción cambiaran las unidades de vegetación entre los años de referencia.

Todos los métodos espaciales fueron aplicados en software de uso libre ILWIS 3.2.

Escenarios de emisiones IE-EE

«El término IE-EE (siglas en español) designa los escenarios descritos en el Informe Especial del IPCC sobre escenarios de emisiones (Tabla 2). Los escenarios IE-EE están agrupa-

dos en cuatro familias (A1, A2, B1, B2) que exploran vías de desarrollo alternativas incorporando toda una serie de fuerzas originantes demográficas, económicas y tecnológicas, junto con las emisiones de GEI (gases de efecto invernadero) resultantes, abarcan todos los órdenes de incertidumbre asociados a las fuerzas determinantes y a las emisiones. Los escenarios IE-EE no contemplan otras políticas climáticas además de las existentes. Las proyecciones de emisión son muy utilizadas para conjeturar el cambio climático futuro, y sus supuestos básicos respecto de la evolución socioeconómica, demográfica y tecnológica, son el punto de partida de numerosos estudios sobre la vulnerabilidad del cambio climático y evaluaciones de impacto». (IPCC, 2000). Los instrumentos de modelización utilizados para desarrollar estos escenarios, cuya escala de tiempo se mide en siglos, son menos adecuados para el análisis de acontecimientos de corto plazo (un decenio, o menos). No existe un único escenario más verosímil, «central» o «más previsible», ni en el marco del IE-EE ni en los trabajos publicados (IPCC, 2007).

Con la aplicación de este método no fue necesaria reducción de escala «downscaling» debido a que se trabajó directamente con las estimaciones de incremento de la temperatura por cada 100 años que establece cada escenario y los mismos fueron aplicados directamente sobre el modelo de temperatura. En este trabajo se calculó el incremento de temperatura para 2,3 y 5 décadas, en base al valor de incremento óptimo que establece cada escenario por cada 100 años, siguiendo las sugerencias del informe especial de emisiones IE-EE (IPCC, 2007).

En la investigación se utilizaron todos los escenarios y en el presente artículo se analiza el escenario B1 y la situación constante.

Limitaciones del método

Entre las posibles limitaciones que tiene el método planteado se encuentra el hecho de no tomar en cuenta otras variables que pudieran probablemente influir en la distribución espacial de la vegetación en el límite de crecimiento arbóreo, como la precipitación, la pendiente,

la exposición solar entre otros, pero se sustentan con diferentes trabajos a nivel fisiológico y poblacional que determinan a la variable temperatura como principal limitante del crecimiento arbóreo en el «*timberline*». En la presente investigación se analizará dicha hipótesis a nivel espacial.

Resultados y discusiones

En el presente estudio se analizaron los cambios ocurridos en la vegetación a lo largo del gradiente altotérmico utilizando el NDVI (Figura 3), pudiendo discriminar las cuatro unidades (selva nublada, bosque preparamero, arbustal preparamero, Páramo) identificadas por (Santaella, 2007), modelando con mayor detalle los complejos cambios ocurridos en el gradiente altotérmico. Por tratarse de una zona transicional las variaciones van ocurriendo de forma gradual, cambiando el predominio de diferentes formas de vida. La utilización de la respuesta espectral de las plantas en determinadas longitudes de onda del espectro electromagnético, permitió modelar de manera continua a través de matrices numéricas los complejos cambios que suceden en la vegetación a lo largo de gradiente altotérmico.

Las variaciones, diferencias e identificación de posibles grupos homogéneos son presentadas a continuación en el análisis ANOVA (Tabla 3) del NDVI de las unidades de vegetación.

El análisis muestra que existen diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,01$) entre

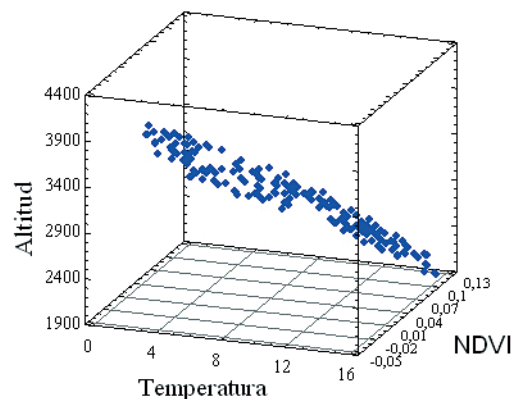


Figura 3. Muestra los valores de NDVI a lo largo del gradiente altotérmico.

Tabla 3. Análisis ANOVA y determinación de grupos homogéneos

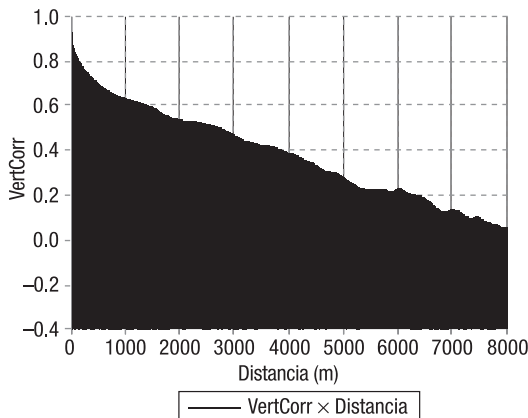
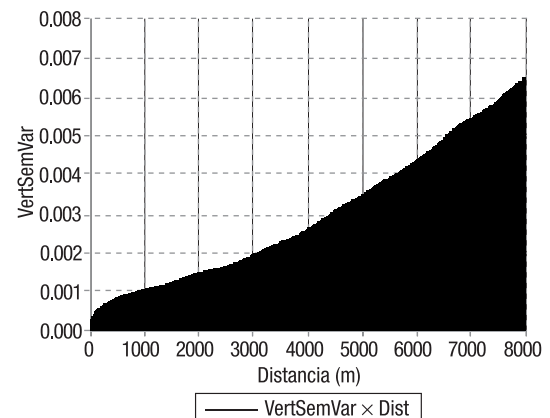
Variable	Unidad de vegetación	Media	«P» Valor
NDVI	SN	0,08a	0,00
	Bp	0,07b	
	Ap	0,04c	
	Pa	-0,04d	

Medias seguidas por la misma letra no son estadísticamente diferentes a un nivel de significación de $p < 0,01$ según la prueba de rangos múltiples de Tukey. SN (Selva Nublada), Bp (Bosque Preparamero), Ap (Arbustal Preparamero), Pa (Páramo), NDVI (índice de vegetación por diferencia normalizada).

las medias del NDVI de las diferentes unidades de vegetación, demostrando la eficiencia del NDVI para la discriminación y análisis de las complejas variaciones de la de la vegetación.

Para analizar la variación espacial continua del NDVI en el gradiente altotérmico se aplicó autocorrelación y semivariograma espacial vertical. En las Figuras 4 y 5, se observa como a medida que aumenta la distancia disminuye la autocorrelación y aumenta la varianza, indicando el potencial de NDVI para modelar y caracterizar los cambios de la vegetación a lo largo del gradiente altitudinal.

El análisis de autocorrelación y semivariograma de superficie junto a los rangos de distribución altitudinal de vegetación determinados en otros estudios (Santaella, 2007; Yáñez, 1998) y el MDE, se utilizaron como base para el establecimiento de las parcelas (Tabla 4

**Figura 4****Figura 5**

Figuras 4 y 5. Correlograma (2) y semivariograma (3) espacial del NDVI con respecto a la distancia en dirección vertical.

Tabla 4. Altitud máxima y mínima de ubicación las parcelas de muestreo del NDVI

Unidad de Vegetación	Altitud mínima de parcela (msnm)	Altitud máxima de parcela (msnm)
Selva nublada	2100	2860
Bosque Preparamero	2860	3100
Arbustal Preparamero	3200 ¹	3350
Páramo	3600	4390

¹ Transición arbórea arbustiva.

y Figura 6). Las mismas no tienen una distancia estrictamente establecidas entre ellas, más bien fueron establecidas en sentido horizontal de manera aleatoria y en sentido vertical (gradiente altotérmico) tomando en cuenta los datos mencionados. Las parcelas fueron establecidas tanto en la parte media del rango altitudinal de cada unidad de vegetación como en los bordes superiores e inferiores por tratarse de una zona de transición. La discriminación de los valores NDVI se realizó a través de un análisis de máxima probabilidad cuyos resultados se detallan posteriormente. En la Figura 6, se observan zonas donde no se establecieron parcelas, esto debido a que se decidió posteriormente ampliar el área de estudio hasta donde los permitía el MDE y el modelo NDVI por tratarse de la misma vertiente.

Por tratarse de una zona de cambios graduales ocurren una mezcla de valores del

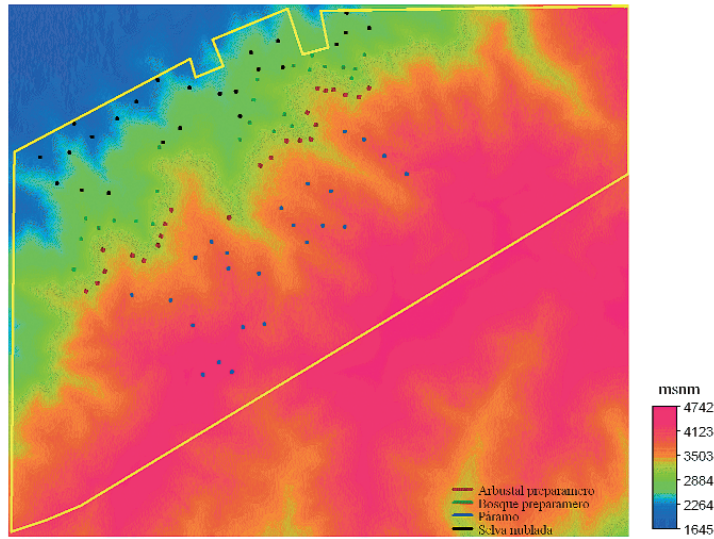


Figura 6. Distribución espacial de las parcelas de muestreo del NDVI en el gradiente altitudinal MDE.

Tabla 5. Probabilidad de los valores NDVI pertenecer a una determinada unidad de vegetación

		NDVI																					
		-0,08	-0,07	-0,06	-0,05	-0,04	-0,03	-0,02	-0,01	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13
Probabilidad	Pa	0,0026	0,0572	0,1302	0,2656	0,3125	0,1432	0,0442	0,0364	0,0052	0,0026	np	np	np	np	np	np	np	np	np	np	np	np
	Ap	np	np	np	np	np	np	0,0026	0,0104	0,013	0,0312	0,0833	0,1223	0,1848	0,1692	0,1562	0,1302	0,0781	0,0182	np	np	np	np
	Bp	np	np	np	np	np	np	np	np	np	np	np	0,0026	0,0312	0,0807	0,1848	0,2968	0,2395	0,125	0,0312	0,0078	np	np
	SN	np	np	np	np	np	np	np	np	np	np	np	np	np	0,0052	0,0078	0,0364	0,1041	0,3125	0,2109	0,1692	0,1197	0,0312

NDVI que representan precisamente los cambios y mezclas de las unidades de vegetación dominadas por diferentes formas de vida. Como se observa en la Tabla 5, ciertos valores del NDVI fueron encontrados en diferentes unidades de vegetación contigua, y a través del análisis de máxima probabilidad se pudo discriminar a que unidad pertenecen dichos valores. El páramo mostró valores de NDVI entre -0.08 y -0.01 , el arbustal preparamero valores entre 0 y 0.05 , el bosque preparamero entre 0.06 y 0.07 y la selva nublada valores entre 0.08 y 0.13 (Figura 7). Con los rangos determinados se clasificó la matriz numérica (NDVI) y se obtuvo el modelo de distribución espacial de las unidades de vegetación del año 2009 (Figuras 8).

A través del análisis espacial del modelo se pudo observar como las diferentes unidades de vegetación estudiadas a través del NDVI muestran una distribución con patrón irregular. A medida que aumenta la altitud se producen

cambios graduales y diferenciables en las formas de vida de la vegetación, pudiendo ser estudiados estos cambios espacialmente a través de la posible relación entre el NDVI y la temperatura.

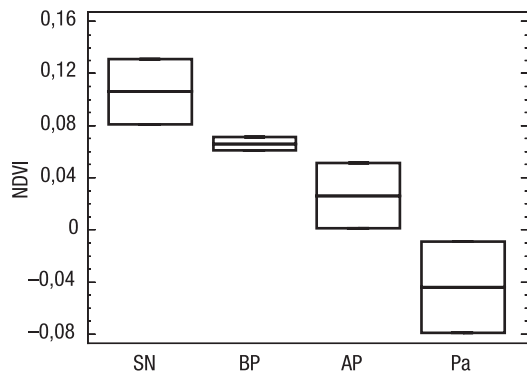


Figura 7. Muestra los rangos de distribución del NDVI para las unidades de vegetación determinadas con el análisis de máxima probabilidad. SN (Selva Nublada), Bp (Bosque Preparamero), Ap (Arbustal Preparamero), Pa (Páramo).

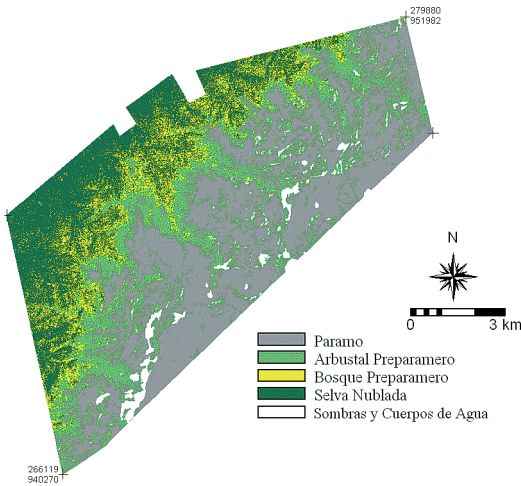


Figura 8. Modelo de distribución espacial de la vegetación para el año 2009 en la zona transicional selva nublada - páramo de la vertiente norte de la Sierra Nevada de Mérida - Venezuela.

Análisis de correlación entre altitud y temperatura

Para corroborar el gradiente altotérmico (0,61°C/100 msnm) determinado por (Rolh, 1952) se realizó un análisis de regresión lineal entre altitud y temperatura (Figura 9) obteniendo un $r^2 = 93,06$ y un valor de gradiente altotérmico exactamente igual al determinado dicho autor.

Análisis de correlación entre NDVI y temperatura

Analizando espacialmente el modelo digital de temperatura y el modelo de distribución actual de la vegetación (Figura 10) puede observarse que existen patrones de distribución irregular de la vegetación que responden al gradiente altotérmico. Se encontraron áreas donde las diferencias topográficas, específicamente valles encajonados y largos que ascienden suavemente generan formas espaciales de «*lenguas de temperatura*» por donde ascienden las formas de vida tanto arbórea como arbustiva, mostrando una clara respuesta de la selva nublada, el bosque preparamero y el arbustal preparamero a dicha variable.

Sustentando lo observado en la Figura 10 se observa en la Figura 11 que existe una fuerte

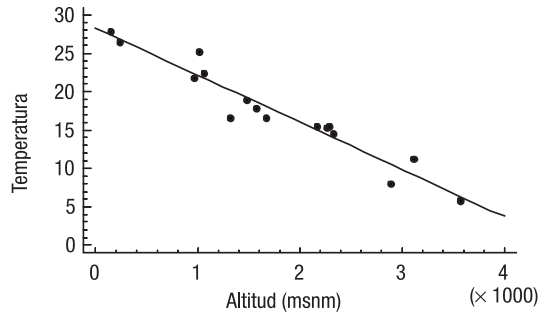


Figura 9. Muestra Correlación entre temperatura °C y altitud.

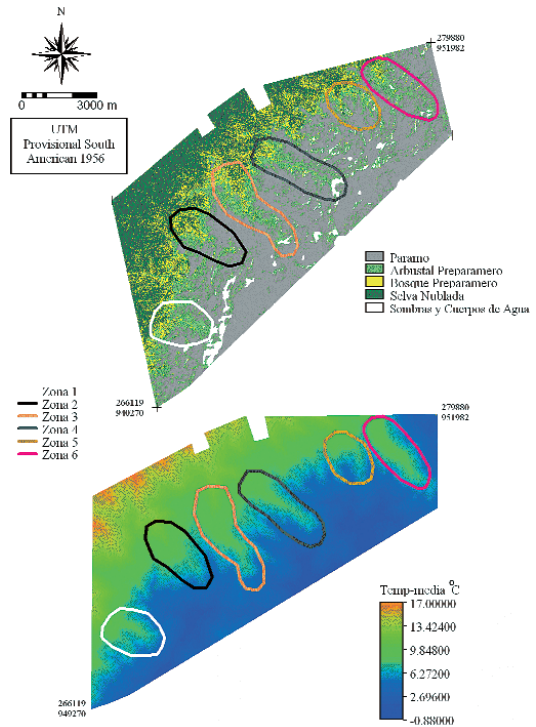


Figura 10. Modelo de distribución espacial actual de la vegetación y el modelo digital de temperaturas medias anual indicando las zonas evidentes donde la vegetación arbórea y arbustiva asciende por las «*lenguas de temperatura*».

correlación entre el NDVI y la temperatura ($r = 0.95$, $r^2 = 90.45$), representando el NDVI los cambios ocurridos en la vegetación como respuesta al gradiente altotérmico.

A través de la correlación entre NDVI y temperatura se generó una ecuación ajustada que permitió modelar la dinámica de la vegetación bajo los escenarios IE-EE del IPCC, donde se muestran cuales serán las posibles respuestas de las unidades de vegetación al calentamiento.

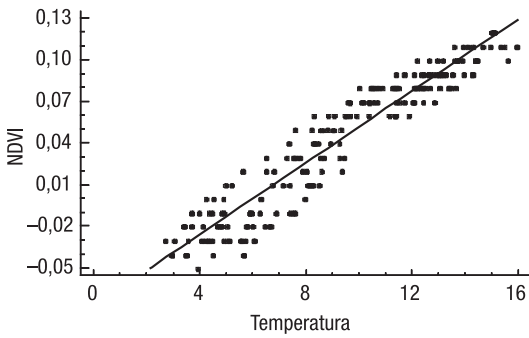


Figura 11. Correlación entre NDVI y Temperatura media anual (°C).

to global, pudiendo explorar y analizar la evolución espacial (¿donde ocurrirán?) y estructural de la vegetación a lo largo del tiempo, sin alterar la heterogeneidad natural y el patrón irregular de distribución espacial que caracteriza el área.

Sobre el «Timberline» actual

El límite de crecimiento arbóreo continuo ha sido relacionado con la posición de la isoterma media del aire entre 8-10°C para las regiones extratropicales y entre 3-6°C para las regiones tropicales (Grace *et al.*, 2002).

En la Figura 12, se observa como el bosque preparamero y la selva nublada se distribuyen sobre el gradiente altotérmico, ajustándose con más precisión a la curva de nivel de los 3340 msnm, donde existe una temperatura media anual de 8.59°C. Se ubicaron pequeñas áreas menos frecuentes donde las formas de vida arbórea ascienden de manera continua hasta los 3800 msnm donde la temperatura media anual es de 5.78°C, pudiendo estar asociadas estas áreas probablemente a composiciones florísticas diferentes, donde ciertas especies arbóreas pioneras pudieran estar colonizando y evolucionando con más eficiencia que otras.

En este sentido (Santaella, 2007) determinó en un estudio espacial comparativo entre 1952 y 1998 la existencia de zonas donde el bosque preparamero en el año 1952 alcanzaba una altitud de 3280 msnm y en el año 1998 fue identificado a los 3480 msnm, éste autor atribuye los cambios a una probable respuesta de la vegetación al calentamiento global, concertando

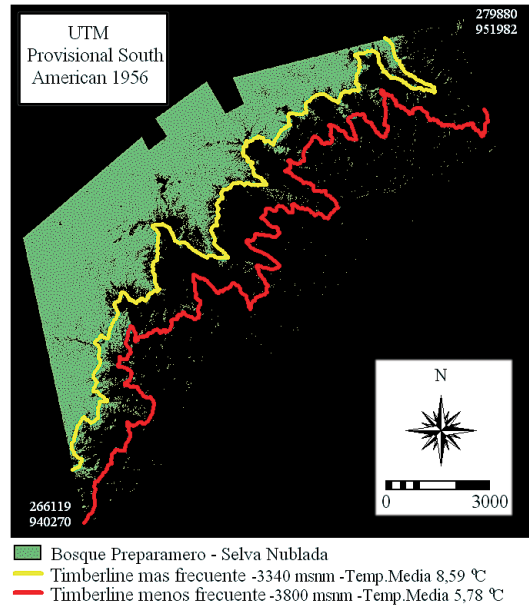


Figura 12. Modelo de distribución continua de las formas de vida arbórea «Timberline» con respecto a las temperaturas medias anuales 8,59 y 5,78°C. 8,59°C (línea superior en la figura) y 5,78°C (línea inferior en la figura).

con (Sanz-Elorza *et al.*, 2003; Klanderud *et al.*, 2003; Penuelas *et al.*, 2003; Walter, 2002, 2003; Grace *et al.*, 2002; Corlett, 1992; Pauli *et al.*, 2001; Keller *et al.*, 2000; Hofer, 1992; Grabherr *et al.*, 1994, 1995, 2001).

En un trabajo realizado recientemente por (Ramirez *et al.*, 2009) entre los estos rangos altitudinales dentro de la misma área de estudio, observaron que efectivamente existe un establecimiento de plantas leñosas pioneras como *Diplostephium venezuelense*, *Cybianthus marginatus* Y *Hesperomeles ferruginea* formando islas o parches de vegetación, resultados parecidos obtuvo (Yáñez, 1998) localizando *D. venezuelense* a los 3600 msnm.

Modelos de distribución espacial de la vegetación bajo escenarios de cambio climático

Situación constante

Se observa en la Tabla 6 y las Figuras 13 y 14, los posibles cambios que ocurrirán en la vegetación bajo una situación de emisiones de

Tabla 6. Superficies (ha) de las unidades de vegetación bajo la situación constante (0,6°C/100 años) para las décadas (2019-2029)-(2039-2049)-(2089-2099)-(2129-2139)-(2189-2199), el año 2009 representa la situación actual

Años	Pa	Ap	Bp	SN
2009	3966	2234	1042	2074
2019-2029	3249,76	2626,2	762,07	2678,52
2039-2049	3249,76	2626,2	762,07	2678,52
2089-2099	3249,76	2626,2	762,07	2678,52
2129-2139	2471,3	3100,73	628,42	3116,11
2189-2199	2471,3	3100,73	628,42	3116,11

SN (Selva Nublada), Bp (Bosque Preparamero), Ap (Arbustal Preparamero), Pa (Páramo).

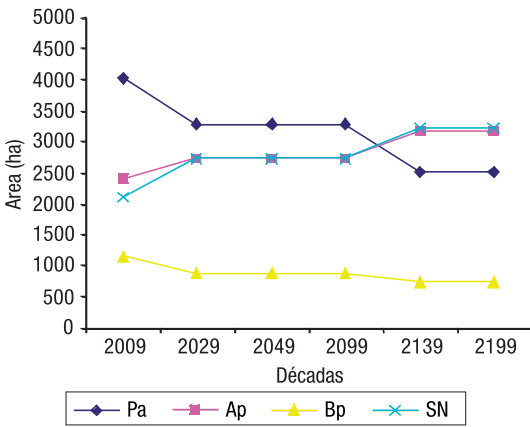


Figura 13. Dinámicas y tendencias de las unidades de vegetación bajo la situación constante (0,6°C/100 años) para las décadas (2019-2029)-(2039-2049)-(2089-2099)-(2129-2139)-(2189-2199), el año 2009 representa la situación actual.

SN (Selva Nublada), Bp (Bosque Preparamero), Ap (Arbustal Preparamero), Pa (Páramo).

GEI constante a las del año 2000 (no es un escenario). Puede observarse como las tendencias del páramo son hacia la pérdida de superficie indicando que existirán procesos de colonización para las épocas provenientes. Igualmente se muestra como las superficies ocupadas por el arbustal preparamero y la selva nublada aumentarán en los próximos años, manteniéndose una serie de procesos evolutivos y de colonización en respuestas al calentamiento global. Los cambios se mostrarán estáticos a través del NDVI entre las décadas (2019-2029) y (2089-2099) reflejando una variación en la década (2129-2139). Esto no quiere decir que las dinámicas de las unidades de vegetación se detienen en este período, más bien que a través del estudio con el NDVI los cambios podrán ser detectados en las décadas (2019-2029 y 2129-

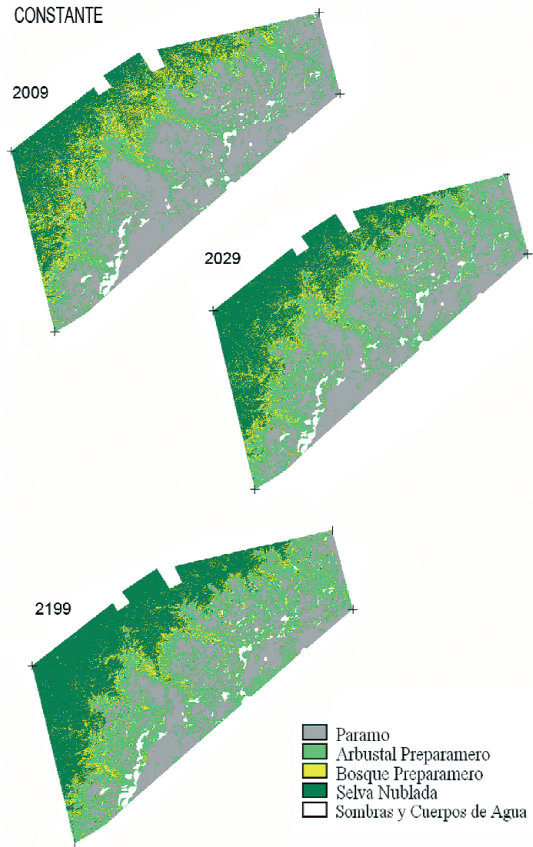


Figura 14. Modelos de distribución espacial de la vegetación bajo la situación constante (0,6°C/100 años) para las décadas (2019-2029), (2189-2199), el año 2009 representa la situación actual.

2139), debido a ello fue necesario correr los modelos en diferentes épocas hasta detectar los puntos de quiebre o cambio.

Escenario B1

Se observa en la Tabla 7 y las Figuras 15 y 16, como el arbustal preparamero y la selva nu-

Tabla 7. Superficies (ha) de las unidades de vegetación bajo el escenario B1 (1,8 °C/100 años) para las décadas (2019-2029)-(2039-2049)-(2089-2099)-(2189-2199), el año 2009 representa la situación actual

Años	Pa	Ap	Bp	SN
2009	3966	2234,00	1042,00	2074,00
2029	3250	2626,20	762,07	2678,52
2049	3250	2626,20	762,07	2678,52
2099	1723	3525,37	627,89	3440,60
2199	487	3879,93	3880,64	4068,50

SN (selva nublada), Bp (bosque preparamero), Ap (arbustal preparamero), Pa (páramo).

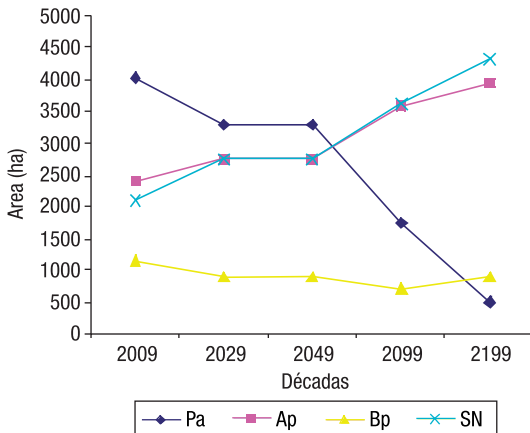


Figura 15. Dinámicas y tendencias de las unidades de vegetación bajo el escenario B1 (1,8 °C/100 años) para las décadas (2019-2029)-(2039-2049)-(2089-2099)-(2189-2199), el año 2009 representa la situación actual. SN (selva nublada), Bp (bosque preparamero), Ap (arbustal preparamero), Pa (páramo).

blada tienden al aumento de superficie, existiendo un rango entre las décadas 2019-2029 y 2039-2049 donde la vegetación no mostrará variaciones a través del NDVI. Por otra parte en el período 2009-2029 cada unidad muestra una determinada tendencia, esto probablemente se deba a que las emisiones considerables de CO₂ comenzaron a partir de la década del 50, época a partir del cual diferentes estudios evidencian un calentamiento progresivo de la superficie terrestre, es decir para el año 2009 ya existen una serie de cambios acumulados que se mostrarán a través del NDVI en la década 2019-2029. Así mismos puede observarse como la superficie del páramo tiende a disminuir, indicando claramente que existirán procesos de colonización, donde a medida que aumenta la superficie de la selva nublada y el arbustal preparamero disminuirá la superficie del páramo.



Figura 16. Modelos de distribución espacial de la vegetación bajo el escenario B1 (1,8 °C/100 años) para las décadas (2019-2029)-(2039-2049)-(2089-2099)-(2189-2199), el año 2009 representa la situación actual.

Análisis de tabulación cruzada entre el año 2009 y la década 2019-2029 bajo los diferentes escenarios IE-EE estudiados

Puede observarse en la matriz de confusión (Tabla 8) que para la década 2019-2029 los cambios serán reflejados de la misma forma

Tabla 8. La matriz de confusión muestra los cambios relativos espaciales y fisionómicos que ocurrirán en la vegetación por efectos del calentamiento global entre el año 2009 y la década 2019-2029 bajo la situación constante y los escenarios, B1, A1T, A1B, A2

		2009				Area total relativa 2019-2029
		Pa	Ap	Bp	SN	
2019-2029	Pa	81,95				34,88
	Ap	18,05	85,48			28,19
	Bp		14,52	42		8,18
	SN			58	100	28,75
Area total relativa 2019-2029		42,57	24	11	22,26	100 %

SN (Selva Nublada), Bp (Bosque Preparamero), Ap (Arbustal Preparamero), Pa (Páramo).

bajo la situación constante y los escenarios; B1, A1T, A1B, A2. Algunos de estos escenarios no eran motivo de análisis en el presente artículo, pero se consideró importante colocarlos ya que en los próximos 18 años bajo cualquiera de los escenarios excepto el A1F1 los cambios serán reflejados con igual magnitud a través del NDVI. Bajo éstos escenarios en la década 2019-2029, 18.95% de la superficie del páramo habrán sido colonizados por el arbustal preparamero, 14.52% del arbustal preparamero se desarrollarán hasta alcanzar el estadio sucesional de bosque preparamero y 50 % de éste último habrán evolucionado hacia selva nublada. La distribución espacial de los cambios puede ser apreciada en la Figura 17.

Análisis de tabulación cruzada entre el año 2009 y la década 2089-2099 bajo los escenarios B1 y A1T del IE-EE

En la Tabla 9 y en la Figura 18, se observan los cambios fisionómicos y procesos de colo-

Constante, B1, A1T, A1B, A2.

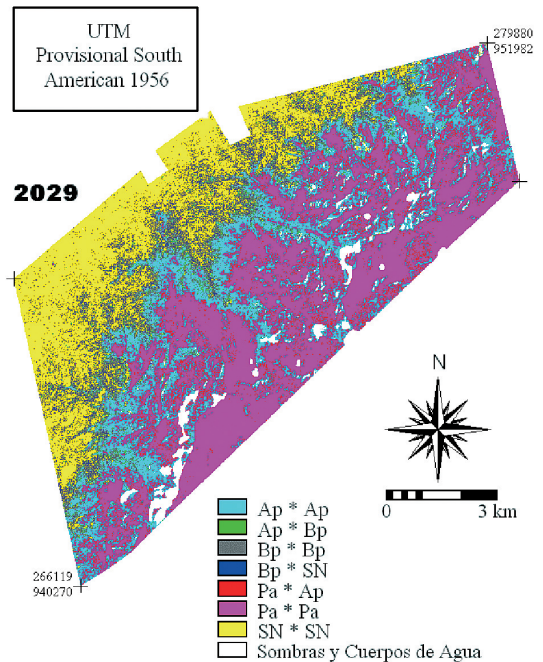


Figura 17. Modelo de distribución espacial de los cambios (tabulación cruzada) fisionómicos y procesos de colonización entre el año 2009 y la década 2019-2029 bajo la situación constante y los escenarios B1, A1T, A1B, A2.

SN (Selva Nublada), Bp (Bosque Preparamero), Ap (Arbustal Preparamero), Pa (Páramo). *(Permanencia o cambio hacia otra unidad de vegetación).

nización que ocurrirán entre el año 2009 y la década 2089-2099 bajo los escenarios B1 y A1T. Para esa época 56.56% de la superficie del páramo habrán sido colonizadas por el arbustal preparamero, 28.10% de éste último se desarrollarán hacia bosque preparamero y 14.52% hacia selva nublada, el 100% del bosque preparamero habrá alcanzado el estadio sucesional clímax de selva nublada. El escenario A1T no es motivo de análisis en el presente artículo, pero se consideró importante colocarlo debido a que los cambios a través del NDVI serán reflejados para dicha década con la misma magnitud que el escenario B1.

Los diferentes modelos estudiados reflejan los cambios que posiblemente ocurrirán en el futuro y coinciden con los cambios observados en el pasado en diferentes investigaciones tanto dentro del área de estudio (Santaella, 2007) como en otras regiones (Sanz-Elorza *et al.*, 2003; Klanderud *et al.*, 2003; Penuelas *et al.*,

Tabla 9. La matriz de confusión muestra los cambios relativos espaciales y fisionómicos que ocurrirán en la vegetación entre el año 2009 y la década 2089-2099 bajo los escenarios B1 y A1T

B1-A1T		2009				Área total relativa 2089-2099
		Pa	Ap	Bp	SN	
2089-2099	Ap	43,44				18,49
	Ap	56,56	57,38			37,84
	Bp		28,10			6,74
	SN		14,52	100,00	100,00	36,93
Área total relativa 1999-2009		42,57	24	11	22,26	100%

SN (Selva Nublada), Bp (Bosque Preparamero), Ap (Arbustal Preparamero), Pa (Páramo).

2003; Walther 2002, 2003; Keller *et al.*, 2000; Grace *et al.*, 2002; Corlett 2002; Pauli *et al.*, 2001; Hofer, 1992, Grabherr *et al.*, 1994, 1995, 2001). En este sentido (Santaella, 2007) determinó en un estudio espacial comparativo entre 1952 y 1998 la existencia de áreas donde el arbustal preparamero y el bosque preparamero se están desarrollando sucesionalmente a estadios más avanzados, por ejemplo formas de vida arbustiva que cambiaron hacia arbórea, dichas dinámicas también han sido observadas por (Lavoie *et al.*, 1992; Hessl *et al.*, 1997), se trata de distintas formas de crecimiento (arbustivos y arbóreos) dentro de las misma especies o especies diferentes como lo descrito por (Noble, 1980) que en este caso responden al gradiente térmico. Estas especies a su vez serán las que dominarán la respuesta espectral de las unidades de vegetación.

A través del análisis espacial se determinó que bajo los escenarios estudiados el páramo será colonizado por el arbustal preparamero en diferentes proporciones, y posteriormente ésta unidad se desarrollará hacia estadios más avanzados dependiendo de la magnitud del aumento de la temperatura. Es interesante destacar que bajo la situación constante la cual refleja un mantenimiento de las emisiones de

Escenarios A1T - B1

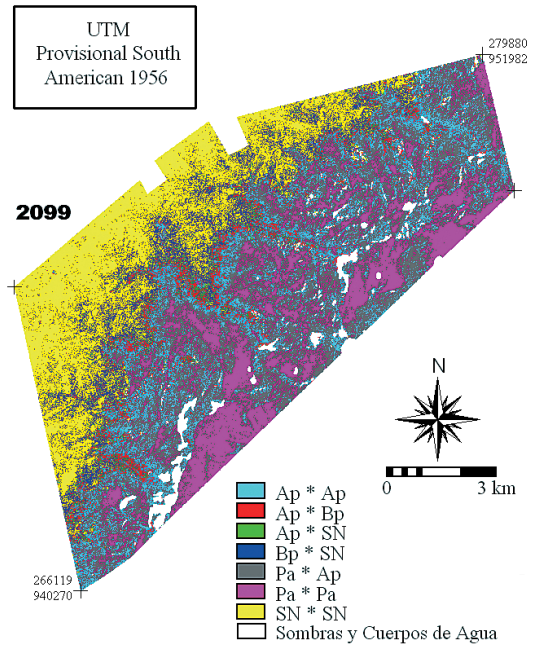


Figura 18. Modelo de distribución espacial de los cambios (tabulación cruzada) fisionómicos y procesos de colonización que ocurrirán entre el año 2009 y la década 2089-2099 bajo los escenarios B1 y A1T. SN (Selva Nublada), Bp (Bosque Preparamero), Ap (Arbustal Preparamero), Pa (Páramo). *(Permanencia o cambio hacia otra unidad de vegetación).

GEI igual a las del años 2000, ya se predicen importantes cambios, tanto espaciales como en las formas de vida, tendiendo el páramo hacia la **extinción** como unidad ecológica. Probablemente las especies que predominarán en las áreas bajo procesos de colonización serán las mismas pioneras identificadas por (Ramirez *et al.*, 2009; Yáñez, 1998) en los parches o islas de vegetación.

Conclusiones

A través del NDVI se pudo modelar las complejas variaciones y mezclas de diferentes formas de vida de la zona transicional «*Timberline*» Selva Nublada - Páramo, donde se producen cambios en la estructura de la vegetación a medida que se asciende en el gradiente altotérmico como respuesta a las variaciones térmicas. Esto demuestra que la vegetación arbórea cambia su estructura y se distribuye es-

pacialmente en dependencia de la temperatura, observando que aquellas áreas donde existen «*lenguas de temperatura*» es por donde el arbustal preparamero y el bosque preparamero ascienden de manera continua y en las partes más cercanas al borde superior del arbustal preparamero están formando islas o parches de vegetación.

Los diferentes escenarios muestran como el límite de crecimiento arbóreo continuo «*Timberline*» cambiará en el tiempo y el espacio, ubicándose a mayores altitudes incluso bajo la situación de emisiones de GEI constante a las del año 2000. Bajo los diferentes escenarios IE-EE estudiados las tendencias son hacia **la extinción del páramo**, la cual será colonizada por diferentes unidades de vegetación, siendo en las primeras décadas por el arbustal preparamero, la cual posteriormente se desarrollará hacia bosque preparamero y selva nublada.

Agradecimientos

Este proyecto fue financiado por el Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación FONACIT-Venezuela, a través de la Agencia Bolivariana de Actividades Espaciales ABAE-Venezuela, adscritos al Ministerio del Poder Popular para la Ciencia, Tecnología e Innovación.

Se agradece al Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais INPE-Brasil y al Centro Regional en Ciencia y Tecnología Espacial para América Latina y el Caribe, CRECTEAL, por todo el apoyo brindado y el conocimiento adquirido.

De igual forma al Laboratorio de Procesamiento Avanzado de Imágenes Satelitales, LPAIS, de la Fundación Instituto de Ingeniería de Venezuela por facilitar de forma gratuita la imagen SPOT 5.

Referencias

- ANDRESSEN, R., ROBOK, A., & ACEVEDO, M. 1996. Escenarios de cambio climático por efecto invernadero y deforestación para Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana* 37 (2): 221-250.
- ATAROFF, M. & SARMIENTO, L. 2003. *Diversidad en Los Andes de Venezuela*. I mapa de unidades ecológicas del Estado Mérida. CD-ROM, Univ. Los Andes, Mérida, Venezuela.
- AUSTIN, M., & SMITH, T. 1989. A new model for the continuum concept. *Vegetation* 83: 35-47.
- AZÓCAR, A., & RADA, F. 1993. *Ecofisiología de Plantas de la Alta Montaña Andina*. Universidad de Los Andes, Mérida. Venezuela.
- BARET, F., GUYOT, G., & MAJOR, D. 1989. Crop biomass evaluation using radiometric measurements. *Photogrammetria* 43: 241-256.
- BARUCH, Z. 1984. Ordination and classification of vegetation along an altitudinal gradient in the Venezuelan páramos. *Vegetation* 55: 115-126.
- CABRERA, H. 1996. Temperaturas bajas y límites altitudinales en ecosistemas de plantas superiores: Respuestas de las especies al frío en montañas tropicales y subtropicales. *Revista Chilena de Historia Natural* 69: 309-320.
- CAMARERO, J., GUTIÉRREZ, E., & FORTÍN, M. 2000. Spatial pattern of subalpine forest-alpine grassland ecotones in the Spanish Central Pyrenees. *Forest Ecology and Management* 134: 1-16.
- CORLETT, R. 1992. The impact of cold and frost on terrestrial vegetation in Hong Kong. *Memoirs of the Hong Kong Natural History Society* 19: 133-135.
- CURRAN, P. 1983. Multispectral remote sensing for the estimation of green leaf area index. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A* 309:257-270. En: Beverly, E y Waring, R. 1994. Remote sensing of leaf area index and radiation intercepted by understory vegetation. *Ecological Applications* 4(2): 272-279.
- GERBERMAN, A., CUELLAR, J., & GAUSMAN, H. 1984. Relationship of sorghum canopy variables to reflected infrared radiation for 2 wavelengths and 2 wavebands. En: La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas* 17 (3): 4-22. Septiembre. 2008.
- GITAY, H., SUÁREZ, A., WATSON, T., & DOKKEN, D. 2002. Cambio climático y biodiversidad. Documento técnico. IPCC.
- GONG, D., & SHI, P. 2003. Northern hemispheric NDVI variations associated with large-scale climate indices in spring. *Int. J. Remote Sensing*. 24, 2559-2566.
- GORTE, B., & KOOLHOVEN, W. 1990. Interpolation between isolines based on the Borgfors distance transform. *ITC Journal* 1990-3: 245-247. ITC, Enschede.
- GORTE, B. 1998. Probabilistic segmentation of remotely sensed images. ITC publication v 63. ITC, Enschede. 143 p.
- GRABHERR, G., GOTTFRIED M., & PAULI, H. 2001. *Long-term monitoring of mountain peaks in the Alps. Biomonitoring: General and Applied Aspects on Regional and Global*. Springer, Berlin.
- GRABHERR, G., GOTTFRIED, M., & PAULI, H. 1994. Climate effects on mountain plants. *Nature* 369: 448.

- GRABHERR, G., GOTTFRIED, M., GRUBER, A., & PAULI, H. 1995. Patterns and current changes in alpine plant diversity. *Arctic and Alpine Biodiversity* (eds. FS Chapin III & C Körner), *Ecological Studies* 113: 169-181. Springer, Berlin.
- GRACE, J., BERNINGE, F., & NAGY, L. 2002. Impacts of Climate Change on the Tree Line. *Annals of Botany* 90: 537-544.
- GRACE, J. 1989. Tree lines. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. London, B. 324: 233-245.
- GRAF, K. 1994. Vegetación y clima de los Andes Bolivianos durante la última época glacial. *Ecología en Bolivia* 23: 1-19.
- HANSEN, A & DI CASTRI, F. 1998. *Ecotonos: what and why?* En: di castri, F. *A New Look at Ecotonos*. International Union of Biological Sciences. USA.
- HANSEN, A., & DI CASTRI, F. 1992. *Landscape boundaries: consequences for biotic diversity and ecological flows*. Springer-Verlag, New York, 395 p.
- HARTE, J., & SHAW, M. 1995. Shifting dominance within a montane vegetation community: Results from a climate warming experiment. *Science* 267: 876-880.
- HESSL, A., & BAKER, W. 1997. Spruce-fir growth form changes in the forest-tundra ecotone of Rocky Mountain National Park, Colorado, USA. *Ecography* 20: 356-367.
- HOFER, H. 1992. Veränderungen in der Vegetation von 14 Gipfeln des Berninagebietes zwischen 1905 und 1985. *Berichte des Geobotanischen Instituts ETH, Stiftung Rübli, Zürich* 58: 39-54.
- HOLTMEIER, F., & BROLL, G. 2007. Treeline advance - driving processes and adverse factors. *Landscape Online* 1: 1-33.
- IPCC. 2007. *Cambio climático: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Equipo de redacción principal: Pachauri, R & Reisinger, A. (directores de la publicación). Ginebra, Suiza. 104 p.
- IPCC. 2000. *Escenarios de Emisiones Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Informe Especial del Grupo de Trabajo III del IPCC.
- KELLER F., KIENAST F., & BENISTON M. 2000. Evidence of response of vegetation to environmental change on high elevation sites in the Swiss Alps. *Regional Environmental Change* 1: 70-77.
- KLANDERUD, K & BIRKS, H. 2003. Recent increases in species richness and shifts in altitudinal distributions of Norwegian mountain plants. *The Holocene* 13: 1-6.
- KREBS, J. 1985. *Ecología, estudio de la distribución a la abundancia*. Harla, S.A. México, D.F. 753 p.
- LAVOIE C., & PAYETTE S. 1992. Black spruce growth forms as a record of a changing winter environment at tree line, Québec, Canada. *Arctic and Alpine Research* 24: 40-49.
- MONASTERIO, M. & VUILLEUMIER, F. 1986. *Introduction: high tropical mountain biota of the world*. En: Vuilleumier, F. & Monasterio, M (Eds.). *High Tropical Biogeography*. Oxford University. New York, USA.
- MONASTERIO, M., & REYES., S. 1980. *Diversidad ambiental y variación de la vegetación en los Páramos de los Andes Venezolanos*. En: Monasterio, M. (Ed.). *Estudios Ecológicos en los Páramos Andinos*. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- MONASTERIO, M. 1980. *Poblamiento humano y uso de la tierra en los altos Andes de Venezuela*. En: MONASTERIO, M. (Ed.). *Estudios ecológicos de los paramos andinos*. 170-198. Edición de la Universidad de los andes. Mérida-Venezuela.
- MOORE, P., CHALONER, B., & PHILIP, S. 1996. *Global environmental change*. Blackwell Science. Australia. En: Hernandez, L. 2006. Posibles efectos del cambio climático sobre la distribución de seis especies vegetales en el Páramo de Merida. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela.
- MYNENI, R. 1995. The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 33: 481-486.
- NETER, J., & WASSERMAN, W. 2004. *Applied linear statistical models*. Georgetown: Irving-Dorsey Ltd. 842 p. En: Almeida, C. 2004. *Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba (sp), Brasil*. *Tesis de doctorado*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. INPE.
- PARUELO, J., EPSTEIN, H., LAUENROTH, W., & BURKE, I. 1997. ANPP estimates from NDVI for the Central Grassland Region of the US. *Ecology* 78:953-958.
- PAULI, H., GOTTFRIED, M., & GRABHERR G. 2001. *High summits of the Alps in a changing climate. 'Fingerprints' of Climate Change - Adapted Behaviour and Shifting Species Ranges* (eds. G-R Walther, CA Burga & PJ Edwards), Kluwer Academic, Plenum Publishers, New York. 139-149.
- PEÑUELAS, J., & BOADA, M. 2003. A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). *Global Change Biology* 9: 131-140.
- PETTORELLI, N., VIK, J., MYSTERUD, A., GAILLARD, J., TUCKER, C., STENSETH, N. 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology and Evolution* 20: 503-510.

- PONZONI, F., & SHIMABUKURO, Y. 2009. *Sensoriamento remoto no estudo da vegetação*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. INPE. Parêntese editora.
- PRETINCE, I., CRAMER, W., HARRISON, S., LEMANS, R., MONSERUD, R., & SOLOMON, A. 1992. A global bioma model based on plant physiology and dominance. Soil Properties and climate. *Journal of Biogeography* 19: 117-134.
- RAMIREZ, L., LAMBÍ, L., SCHWARZKOPF, T., GAMEZ, L., & MÁRQUEZ, N. 2009. Estructura de la vegetación en la zona de transición Bosque-Paramo en la Sierra Nevada de Mérida: Implicaciones para analizar la dinámica del límite forestal. *Ecotropicos* 022 (2): 83-98.
- RIPPLE, W. 1985. Asymptotic reflectance characteristics of grass vegetation. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. En: La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas* 17 (3): 4-22. Septiembre. 2008.
- RISSER, P. 1995. The status of the science examining ecotones. *Bioscience* 45: 318-325.
- ROHL, E. 1951. Sobre el gradiente térmico vertical de Venezuela. *Boletín de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales* 14(44): 3-60.
- ROUSE, J. W., HASS, R. H., SCHELL, J. A., & DERLING, D. W. 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. En: *Earth resources technology satellite-1 Symposium*, 3. Proceedings. Washington, v. 1, Sec. A: 309-317.
- RUNNING, S. 1990. Estimating primary productivity by combining remote sensing with ecosystem simulation. En: *Remote Sensing of Biosphere Functioning*. (Hobbs, R & Mooney, H., eds). 65-86, Springer-Verlag.
- SAKAY, A., & LARCHER, W. 1987. *Frost survival of plants: response and adaptation to freezing stress*. Springer-Verlag, Berlin, 321 p.
- SANTAELLA, W. 2007. Cambio del paisaje en la línea transicional páramo-selva nublada, sector La Aguada de la Vertiente Norte de la Sierra Nevada de Mérida- Venezuela. *VII Convención Internacional Sobre Medio Ambiente y Desarrollo - I Congreso Internacional sobre Cambio Climático*. La Habana, Cuba. (CD-ROM, ISBN: 978-959-304-003-7).
- SANZ-ELORZA, M., DANA, E., GONZALES A., & SOBRINO, E. 2003. Changes in the High mountain Vegetation of the Central Iberian Peninsula as a Probable Sing of Global Warming. *Annals of Botany* 92: 273-280.
- SARMIENTO, G. 1986. *Ecological features of climate in high tropical mountainins*. En: Vuilleumier, F & Monasterio, M. *High altitude tropical biogeography*: 11-45. Oxford University Press. Oxford.
- SARMIENTO, G. 1986. Principales Gradientes ecolimáticos de los andes Tropicales. *Simposio de Ecología de Tierras Altas. Anuales del VI Congreso Latinoamericano de Botánica*. Vol 1. Colombia.
- SCHUBERT, C., & VIVAS, L. 1993. *El cuaternario de la Cordillera de Merida*. Universidad de los Andes. Fundación Polar. Mérida, Venezuela.
- SELLERS, P. 1985. Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*. En: La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas* 17 (3): 4-22. Septiembre. 2008.
- SLATYER, R., & NOBLE, I. 1992. *Dynamics of Montane Treelines*. En: Hansen, A & di Castri, F (Eds.). *Landscape Boundaries: Consequences for Biotic Diversity and Ecological Flows*. Springer - Verlag. New York, USA.
- TUCKER, C. 1977. Resolution of grass canopy biomass classes. *Photogrammetric Engineering and Remote* 43: 1059-1067.
- VEILLON, J. 1974. Relaciones entre los Bosques Naturales y el Clima en diferentes zonas ecológicas del Noroccidente de Venezuela. Informe del CDCH. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- WALTHER, G., BEIBNER, S., & POTT, R. 2005. Climate change and high mountain vegetation shifts. En: BROLL, G & KEPLIN, B. (Eds.). *Mountain ecosystems. Studies in Treeline. Ecology*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 77-95. 232 p.
- WALTHER, G., POST, E., CONVEY, P., MENZEL, A., PARMESAN, C., BEEBEE, T., FROMENTIN, J., HOEGH-GULDBERG, O., & BAIRLEIN, F. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416: 389-395.
- WALTHER, G. 2003. Plants in a warmer world perspective. *Plant Ecol. Evol. Syst.* 6: 169-185.
- WANG, J. 2003. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. *Int. J. Remote Sensing*. 24: 2345-2364.
- WIESER, G., & TAUSZ, M. 2007. Trees at their Upper Limit: Treelife limitation at the alpine timberline. *Plant Ecophysiology* 5. Springer, 232 p.
- YÁNEZ, A. 1998. Caracterización florística en un sector de cambio Páramo - Selva Nublada en el Parque Nacional Sierra Nevada, Venezuela. *Rev. Forest. Venez.* 42(1): 51-62.
- ZHAO, N., YANG, Y., & ZHOU, X. 2010. Application of geographically weighted regression in estimating the effect of climate and site conditions on vegetation distribution in Haihe Catchment, China. *Plant Ecology*. 209: 349-359.