

ANÁLISIS DEL PAISAJE Y DE SU RELACIÓN CON LA REGENERACIÓN DEL ROBLE (*QUERCUS HUMBOLDTII* BONPL.) EN EL MUNICIPIO DE POPAYÁN, DEPARTAMENTO DEL CAUCA¹

Analysis of landscape patterns and their relationship with oak (Quercus humboldtii Bonpl.) regeneration in the municipality of Popayan, Cauca.

Palabras clave: análisis de componentes principales, clasificación no supervisada, ecología del paisaje, métricas del paisaje, robledales, sistemas de información geográfica.

Key words: principal component analysis, unsupervised classification, landscape ecology, landscape metrics, oaks, geographic information systems.

Alexander Cabezas Gaviria²
Román Ospina Montealegre³

RESUMEN

Se determinó el patrón del paisaje de tres zonas con presencia de roble, ubicadas en el municipio de Popayán (Clarete, Rejoja y Pisoje). Para la clasificación de los usos del suelo se utilizaron dos imágenes Landsat de diferente año, teniendo en cuenta los polígonos mayores a 1.5 ha. Después de categorizar las coberturas inscritas en los tres paisajes, se calcularon las variables cuantitativas de estos utilizando Patch Analyst. Para describir su estructura se utilizó: el número de parches, área promedio, el índice de forma, la dimensión fractal y la relación perímetro/área. Para evaluar la dispersión y fragmentación se utilizaron tres índices: el de distancia media al vecino más próximo, el de proximidad media y el de dispersión/adyacencia. Se registraron las variables de: comunidad, área basal, pendiente, porcentaje de luz y densidad de regeneración en una parcela de 3600 m² en cada paisaje. Con la información registrada a nivel de paisaje y de comunidad, se realizó un análisis de componentes principales (PCA). Los dos primeros componentes explicaron el 91.4% de la variabilidad de los datos y estuvieron determinados en

mayor proporción por variables del paisaje y en menor medida por factores propios de comunidad. Posteriormente se realizó un análisis de correlación y la prueba no paramétrica Kruskal Wallis, a partir de la cual se determinó que las variables de mayor incidencia sobre la regeneración de roble fueron la distancia al vecino más próximo en parches de bosque secundario, índice de proximidad media en parches de bosque de roble y el índice de yuxtaposición en parches de bosque plantado.

ABSTRACT

Landscape patterns were determined for three different areas having oak populations in the Popayán municipality (Clarete, Rejoja and Pisoje). Two Landsat images from different years and polygons with areas equal or greater than 1.5 hectares were used for land use classification. Patch Analysis software was used in order to determine quantitative variables. Structure description included: number of patches, mean patch size, mean patch index, mean patch fractal dimension and mean perimeter-area ratio. Dispersion and fragmentation were evaluated with the three indexes: Mean

¹ Proyecto Corredor de conservación de robles, una estrategia para la conservación y manejo forestal en Colombia. Fundación Natura. Resumen Tesis de Grado. Universidad del Cauca. Facultad de Ciencias Agropecuarias.

² Investigador Universidad del Cauca. Proyecto Roble, Convenio JAC Clarete Alto- CRC. Proyecto Robles Fundación Natura. acabezas@unicauca.edu.co

³ Investigador Universidad del Cauca. Coordinador del programa de Ingeniería Forestal. Proyecto Roble, Convenio JAC Clarete Alto- CRC. rospina@unicauca.edu.co

Nearest Neighbor Distance, Mean Proximity Index and Interspersion Juxtaposition Index. Community variables included: basal area, terrain slope, light percentage and regeneration density, and were measured in an area of 3600 m² for each landscape. Landscape and community information were analyzed using principal component analysis (PCA). The first two components explained 91.4% of data variability; they were determined mostly by landscape variables than community factors. Correlation analysis and the Kruskal-Wallis test showed that the variable of major importance regarding oak tree regeneration were the Neighbor Distance in secondary forest patches, the Mean Proximity Index in oak tree forest patches and the Juxtaposition Index in patches of planted forests.

INTRODUCCIÓN

Las interacciones entre plantas y polinizadores son vulnerables a las actividades productivas de los humanos, las actividades que reducen la cobertura, aíslan o alteran un hábitat inciden de manera directa en la persistencia de las especies ya sea por la relación que exista entre los agentes polinizadores y la facilidad de su regeneración (Murcia 2002).

La fragmentación es un fenómeno que consiste en la reducción de grandes áreas de bosque continuo a mosaicos conformados por parches de bosque de diversas formas, inscritos en otros usos del suelo distintos. Forman (1995), destaca diversos procesos de transformación del paisaje, dentro de los cuales la fragmentación del hábitat es uno de los más importantes. Los efectos espaciales como la variación del tamaño, el número de parches, la forma, dimensión fractal, conectividad y aislamiento, entre otros, inciden sobre numerosos procesos ecológicos. El patrón del paisaje es el resultado de la interacción entre factores biológicos y socioeconómicos (Helmer 2000), pero la ocurrencia de algunos patrones del paisaje forestal no son aleatorios, sino que están determinados por factores socioeconómicos la urbanización, la deforestación, la agricultura y la reforestación son algunos ejemplos (Helmer 2000, Forman & Collinge citado por Marrubio, 2004).

La caracterización del paisaje desde el punto de vista de su estructura, diversidad y composición permite determinar las tendencias o patrones del paisaje, asunto que resulta importante para la conservación de los bosques, dado el efecto que puede llegar a tener sobre algunos atributos de su biodiversidad. Algunos estudios han demostrado que muchos de los procesos ecológicos que suceden en áreas específicas pueden estar determinados por factores externos al área de interés (Finegan citado por Smith *et al.* 1997). La regeneración es la fase final del proceso reproductivo de los árboles que se puede considerar como una serie de fases consecutivas, las cuales comprende la fenología de la floración, los sistemas de polinización y fecundación, los procesos de dispersión de frutos y semillas, la latencia o dormancia de las semillas y la germinación de las mismas. La regeneración corresponde al establecimiento de las plántulas y su mantenimiento dentro de un ambiente en donde ellas puedan crecer hasta convertirse en árboles sexualmente maduros (Lamprecht 1990). El presente trabajo de investigación tuvo como propósito establecer la relación entre las características del paisaje y la regeneración del roble (*Quercus humboldtii*); de igual manera contribuir al conocimiento sobre el proceso de regeneración y supervivencia de esta especie en relación con el entorno paisajístico.

METODOLOGÍA

El estudio se realizó en 3 zonas diferentes que corresponden a tres veredas del municipio de Popayán, en el departamento del Cauca (Figura 1). La vereda Clarete localizada entre las coordenadas máximas N: 769 122– W: 1 058 884 y mínimas N: 764 097– W: 1 063 933, en la zona nororiental del municipio de Popayán, entre los 1800 y 2000 metros de altura; la vereda la Rejoya entre las coordenadas máximas N: 769 813– W: 1 053 519 y mínimas N: 767 800– W: 1 058 577, está localizado a 18 Km, al noroccidente de Popayán, se encuentra ubicada entre los 1600 y 1800 de altitud.; la vereda Pisoje entre las coordenadas máximas N: 763 843– W: 1 056 338 y mínimas N: 758 819– W: 1 061 354, al oriente del municipio .

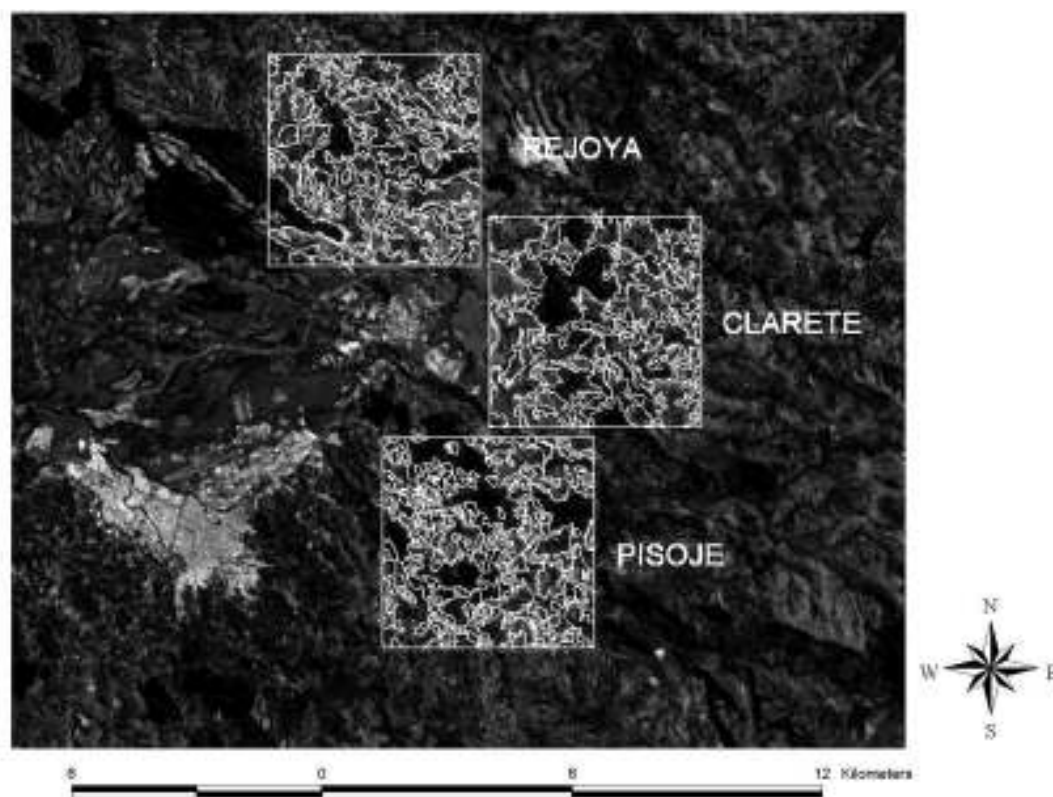


Figura 1. Localización de tres paisajes con bosque de roble estudiados en Popayán Cauca.

En este proyecto de investigación se trabajó a nivel de comunidad y del paisaje. A nivel de comunidad se muestreó la regeneración de roble *Quercus humboldtii* (cantidad de individuos con más de 30 cm de altura y menos de 10 cm de DAP), en 9 parcelas de 5x5 metros (25 m²) dentro de cada paisaje. Las 9 parcelas fueron inscritas de manera sistemática en parcelas cuadradas de 20x20 metros (400 m²), las cuales se emplearon para determinar el área basal. Para uno de los sitios se utilizaron los datos de una parcela permanente existente ubicada en la vereda Clarete, levantada por el Grupo de Investigación Bosques y comunidad del Programa de Ingeniería Forestal de la Universidad del Cauca. El número de parcelas requerido con un error de muestreo del 15% y un 95% de confiabilidad estadística, se calculó con base en los datos de área basal, considerando su alta relación con la variable regeneración. A cada parcela de 400 m² se le registró la pendiente o inclinación en porcentaje medida con clinómetro, porcentaje de luz determinada a partir de una fotografía digital y la ayuda del software Image J; el área basal de los árboles con diámetro a la altura del pecho ≥ 10

centímetros; y por último se registró el paisaje fisiográfico donde se encontraron las parcelas a partir de información secundaria sobre la zona.

Para el estudio a nivel de paisaje se realizó una búsqueda de imágenes de satélite en el sitio web: <http://glcf.umd.edu/index.shtml>, de donde se descargó una imagen de satélite Landsat en formato GEOTIFF del 22 de septiembre de 2005, también se utilizó una imagen Landsat del ocho de marzo del año de 1998. Posteriormente, se realizó una clasificación no supervisada de la imagen satelital mediante el software SPRING 4.3.1, la clasificación y segmentación fue por regiones, en cuanto a la segmentación se realizó con la técnica de agrupamiento de datos llamado crecimiento de regiones; la clasificación se basó en el clasificador Isoseg. Después de este proceso se clasificaron los elementos del paisaje en un sistema jerárquico de categorías de cobertura, localizando las áreas de mayor extensión de robledales cercanos a Popayán. Las categorías identificadas para los tres paisajes clasificados se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Descripción de las categorías de clasificación de coberturas para tres paisajes evaluados en el municipio de Popayán, Cauca.

| CATEGORÍA | DESCRIPCIÓN |
|---------------------|--|
| Plantación forestal | Cobertura vegetal arbórea que ha sido plantada con fines de manejo forestal comercial. |
| Bosque secundario | Bosque con dominancia de especies de rápido crecimiento y de corta duración |
| Bosque abierto | Bosque con dosel discontinuo y actividades agropecuarias asociadas. |
| Roble | Parches de bosque simplificados y dominados por la especie <i>Quercus humboldtii</i> . |
| Pastos | Vegetación de tipo graminoide natural o plantada. |
| Pastos con rastrojo | Vegetación de tipo graminoide natural o plantada, con árboles y arbustos, pero en forma dispersa. |
| Rastrojo | Incluye rastrojo alto y bajo, vegetación herbácea o leñosa que nace por regeneración natural, en un terreno despojado de su cobertura vegetal o dejado sin cultivo por un tiempo |
| Cultivos | Vegetación compuesta por especies de uso agrícola y forestal. |

Las coberturas interpretadas por el mosaico de las imágenes satelitales, se corroboraron a partir de diferentes salidas de campo, utilizando las coordenadas obtenidas del mapa ya clasificado y un GPS Garmin 76S, donde se asignaron los nombres de las coberturas que se identificaron en campo. Para la clasificación solo se tuvieron en cuenta polígonos de un área mayor a 1.5 ha, esto debido a que en parches de un área menor a la establecida no se identifica en la clasificación utilizada, en este proyecto, una cartografía de escala 1:100.000. Una vez identificadas las zonas donde estaba inscrito el roble, y la posterior corroboración en campo de todos los parches aledaños, se establecieron tres parcelas cuadradas de 25 Km² sobre la imagen satelital, seleccionadas por contener un área extensa de bosques de roble y por permitir comparar diferentes matrices de los paisajes; para esto se realizó un recorte o extracción de una ventana considerando el área de trabajo para mejor detalle y espacio, quedando ubicadas las veredas de La Rejoya, Clarete y Pisoje. Para evaluar los atributos del paisaje en cada parcela de 25 km² se empleó la extensión de Arcview llamada Patch Analyst 3, a partir de esta, se calcularon 9 variables: el número de parches, área promedio, desviación estándar, índice de forma, dimensión fractal, la media de la relación perímetro/área e índices de dispersión/adyacencia y fragmentación.

Se realizó un análisis de componentes principales para determinar las variables de mayor incidencia sobre la variabilidad de la información,

posteriormente se hizo un análisis de correlación con las variables tanto de paisaje, como de sitio con más influencia sobre la regeneración de roble. Estas variables fueron sometidas a un análisis de normalidad, lo que llevó a realizar comparaciones de las mismas a partir de pruebas no paramétricas. Por último, a partir de análisis de regresión se construyeron modelos matemáticos, con el fin de establecer la relación entre variables del sitio y la regeneración de roble.

RESULTADOS

RIQUEZA Y COMPOSICIÓN DE LOS PAISAJES

A partir de la categorización de las diferentes coberturas, se encontró que la categoría pastos en todos los paisajes fue la de mayor área, por encima del 25% respecto al área total. Para los paisajes de Pisoje y la Rejoya la categoría de pasto con rastrojo es la segunda más importante, mientras que en Clarete los bosques de roble ocupan la segunda posición con un 20%. También se encontró para las plantaciones comerciales en los paisajes de la Rejoya y Pisoje porcentajes del 15.13% y 16.33% respectivamente; para Clarete esta categoría no presentó un área significativa. También se observó que el bosque secundario para Clarete y la Rejoya presenta porcentajes que oscilan del 6% (Clarete) al 7%, situación que resultó diferente para Pisoje donde el bosque secundario fue menos importante que los rastrojos, los cuales se encontraron en mayor porcentaje; de igual

manera la categoría bosque abierto fue encontrado únicamente en este paisaje. Con respecto a los cultivos agrícolas se encontró que no alcanzan a sumar el 7% del área total de los tres paisajes.

Para el paisaje Clarete se encontró que los parches de roble son más grandes que en los otros dos paisajes y el número de estos es menor, lo que representa un paisaje con robledales menos fragmentados. Este resultado que coincide con lo reportado por Helmer (2000), si se considera que este paisaje está localizado en áreas de mayor pendiente, altitud y más distante de las vías principales. Por otra parte, se observó que el bosque secundario tiende a presentar porcentajes parecidos que van del 10% al 13% en los diferentes paisajes, diferenciándose en Clarete por presentar un mayor porcentaje en el número de parches, significando una mayor fragmentación de este bosque con respecto a los demás paisajes; lo que explica el efecto de una mayor área de borde de bosques maduros sobre el patrón de los bosques secundarios para este estudio. Las plantaciones forestales presentan porcentajes de área similares en la Rejota y Pisoje que van desde el 15.13% hasta el 16.33% aunque para el primer paisaje cuenta con mayor número de parches, determinando a Pisoje como el paisaje menos fragmentado y más abundante con relación a estos bosques manejados. Las coberturas de pastos con rastrojo y rastrojo fueron significativas para los tres paisajes; no obstante la primera fue más abundante que la segunda, además para Pisoje los rastrojos tienen un porcentaje mayor que los otros dos paisajes.

ESTRUCTURA DE LOS PAISAJES

Se tuvieron en cuenta las características que eran más influyentes en los resultados según un análisis de correlaciones y un análisis de componentes principales. Los paisajes Clarete y la Rejota presentaron similitud en el número de parches: 120 en ambos, y en el tamaño promedio de los mismos 21.24 ha y 22.30 ha respectivamente. El paisaje que presentó resultados diferentes en cuanto a su estructura fue Pisoje, reportando 281 parches y un área promedio de 9.09 (ha). Con el número de parches se muestra la tendencia progresiva que se encontró al comparar los tres paisajes desde el punto de vista de su fragmentación, evidenciando

un incremento en el número de parches de robledal y plantaciones comerciales, desde el paisaje menos fragmentado (Clarete) hasta el más fragmentado (Pisoje). Con respecto al tamaño, la cobertura de bosque de roble, no cuenta en ningún paisaje estudiado con un área mayor a 200 ha. La forma de los parches de roble, cambia según el paisaje, encontrando así a la forma oval redondo como la categoría que tiene mayor número de parches, aunque el paisaje con mayor representatividad de esta es Pisoje, este resultado es probable que se de por el tamaño de sus fragmentos, ya que en los 25 km² no se encontraron parches grandes, mientras que en Clarete no se reportaron datos para esta clasificación. Las categorías oval oblongo y rectangular oblongo, reportaron parches en todos los paisajes, aunque la primera categoría es mayor, representando a si forma de parches simples. Los parches amorfos son fragmentos complejos con muchos lóbulos, encontrados en todos los paisajes estudiados.

Se corrió un modelo para determinar la relación existente a nivel del área del parche y su dimensión fractal; el modelo después de un ajuste a las variables, explica el 70% de la variación. Se observó que existe una agrupación cuando aumenta el tamaño del parche indicando un baja dimensión fractal. Según Krummel, citado por Romero (1998), la dimensión tiende a ser baja en parches forestales (en este caso bosque secundario) altamente perturbados, debido a que estos presentan perímetros regulares.

Con respecto a la dispersión de los parches se calculó el índice al vecino más próximo, el cual aumenta de valor a medida que aumenta la dispersión entre los parches. En el paisaje de Clarete, los parches más compactos fueron los pastos y los parches de roble, similar a lo reportado para el paisaje de la Rejota; en cuanto al paisaje de Pisoje se demuestra que los parches con un arreglo espacial compacto fueron los pastos, rastrojos y pastos con rastrojos. En conclusión, los parches de mayor grado de dispersión para Clarete son los rastrojos y el bosque plantado; para la Rejota son los cultivos y los rastrojos y en cuanto al paisaje de Pisoje son el Bosque Abierto y los cultivos. También se calculó el índice de proximidad media que muestra valores

reducidos en paisajes que se encuentran más fragmentados y aislados. Para este caso en el paisaje de Clarete se observó que la cobertura de bosque de roble tiene un menor grado de fragmentación, respaldado por el número de parches de esta cobertura el cual es menor para este paisaje, mostrando el efecto de grandes áreas de bosque maduro sobre el patrón de la restauración del bosque como lo reporta Helmer (2000). Para los paisajes de la Rejoja y Pisoje se destacan las plantaciones comerciales y el pasto con rastrojo respectivamente, pero teniendo en cuenta que la mayoría de las coberturas para este último paisaje arrojan índices bajos, explicando la alta heterogeneidad de este paisaje demostrado por una mayor fragmentación en sus coberturas.

Por último se calculó el índice de yuxtaposición o índice de adyacencia (IJI) el cual indica dispersión y fragmentación; si el valor es igual a cero significa que el parche es único y a medida que se acerca a 100 significa que existe un grado de distribución mayor, expresando una mayor adyacencia y cantidad de los parches. Según los resultados, se observó que los tres paisajes poseen características similares, aunque el paisaje de la Rejoja cuenta con algunas clases, como los cultivos y el bosque de roble, que se diferencian de las demás coberturas

por tener un índice bajo de adyacencia, sugiriendo poca abundancia y a sí mismo una considerada concentración de los parches, pero por lo general según Romero (1998), los valores mayores a 60 indican que los parches, no solamente son abundantes sino que se encuentran distribuidos por casi todo el territorio demostrando así una fragmentación alta para los parches estudiados. En cuanto al bosque plantado, es una de las coberturas que demuestra una alta distribución y alta abundancia.

DIVERSIDAD DE LOS PAISAJES

La diversidad paisajística, es la diversidad que tiene el paisaje respecto a su composición. Para los tres paisajes evaluados se tomó el índice de distribución y abundancia de Shannon (SEI), ya que considera la distribución y abundancia espacial de los parches de cada una de las clases paisajísticas. En la figura 2, se muestra la diversidad de los tres paisajes evaluados, encontrando que el paisaje de Clarete es el más homogéneo de todos y debido a que este es el que más se aleja de la unidad, se determina como el menos fragmentado en comparación con los demás. Así mismo, Pisoje demuestra ser el paisaje más diverso y fragmentado, donde además se encontró una cobertura diferente (bosque abierto), que no se observó en los otros paisajes.

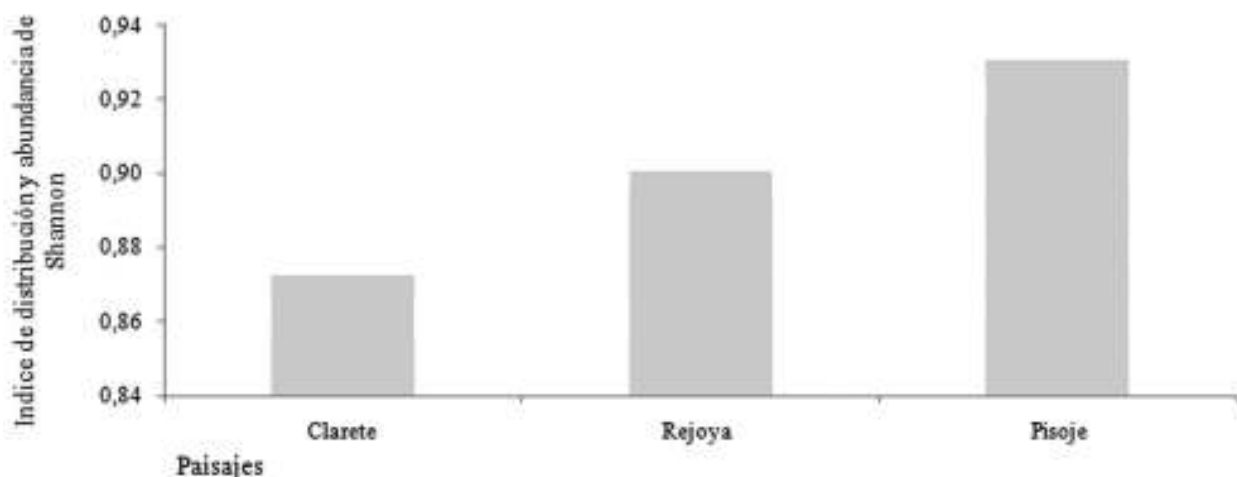


Figura 2. Índice de la diversidad paisajística, encontrada en tres paisajes evaluados, en el municipio de Popayán, Cauca.

REGENERACIÓN DE ROBLE

Con base en datos de 24 parcelas levantadas en un estudio anterior, se encontró que 9 es un tamaño óptimo para el estudio de los parámetros regeneración y área basal; donde el coeficiente de variación para la regeneración fue 36.88 siendo este el parámetro menos homogéneo. La regeneración de roble presentó diferencias significativas. En las parcelas ubicadas en los paisajes de Clarete, Rejoya y Pisoje se encontró que la menor densidad de regeneración, fue para el primer paisaje y el máximo para Pisoje. Teniendo en cuenta que para todos los datos el coeficiente de variación supera el 20%, indicando que la media no es representativa, se utilizaron los datos del percentil 85 para garantizar una mayor representatividad de las parcelas. Considerando lo anterior, el número de individuos promedio varía para los tres paisajes, resaltando a Pisoje por su alta regeneración del *Q. humboldtii* y a Clarete como el de la más baja. Para la pendiente del terreno se encontró una clasificación hecha por INVIAS donde se le categoriza a Clarete como terreno ondulado, La Rejoya terreno plano y Pisoje montañoso. El área basal registrada fue mayor en la Rejoya contrario a lo que se encontró para el porcentaje de luz el cual fue menor en este paisaje indicando una poca incidencia de luz en el bosque.

INCIDENCIA DEL PAISAJE SOBRE LA REGENERACIÓN DE ROBLE

Variables a nivel de sitio

No se encontró correlación entre las variables de sitio y las variables de respuesta. Sin embargo, se encontró que la regeneración del roble puede ser descrita a

partir de la combinación de las tres variables de sitio evaluadas (área basal, pendiente, porcentaje de luz) y a partir de este ejercicio se construyeron tres modelos matemáticos uno para cada paisaje. Las tres ecuaciones se muestran en el anexo Tabla 2, y representan modelos logarítmicos múltiples, para todos se analizó el estadístico de Durbin-Watson que fue mayor a 1.4 en todos los casos indicando una correlación positiva; con lo anterior podemos decir que los modelos de regresión pueden ser de utilidad para predecir el número de individuos de roble en cada una de las zonas estudiadas.

Variables a nivel de comunidad

Para determinar las variables más significativas a nivel de comunidad se aplicó la metodología del Análisis de Componentes Principales (ACP), empleando los datos obtenidos en campo (número de individuos, área basal, porcentaje de luz, pendiente) y los datos de las variables del paisaje. El resultado de los tres primeros componentes explican el 94.8% del modelo, aunque a partir de los dos primeros ya se obtiene el 91.4% de la varianza. Estos dos componentes están representados por las variables del paisaje, como se observa en la figura 3, donde para el primer componente (51.5% de variación explicada) el caso que más se asocia es el área promedio de los bosques de roble y para el segundo componente (39.9% de variación explicada) fue el número de parches de bosque secundario. Se deja solo el 3.4% de explicación del modelo a las variables de sitio. Los valores de mayor representatividad se tuvieron en cuenta para generar una matriz de correlación con estas variables, con nuestra variable respuesta y objetivo de esta investigación,

Tabla 2. Modelos de regresión para cada paisaje, utilizando el número de individuos como variable respuesta y la pendiente, área basal, porcentaje de luz de cada parcela, como variables independientes.

| Paisajes: | Modelo de Regresión | R ² |
|-----------|--|----------------|
| Clarete: | $\text{LOG}(\text{No ind}) = 1.3603 + 0.525298 \cdot \text{LOG}(m) + 0.16688 \cdot \text{LOG}(G) + 0.018909 \cdot \text{LOG}(\%L)$ | 83.6% |
| Rejoya: | $\text{LOG}(\text{No ind}) = 5.09473 - 0.386743 \cdot \text{LOG}(m) + 0.133435 \cdot \text{LOG}(G) + 0.294535 \cdot \text{LOG}(\%L)$ | 86.3% |
| Pisoje: | $\text{LOG}(\text{No ind}) = 4.40109 - 0.051656 \cdot \text{LOG}(m) - 0.812577 \cdot \text{LOG}(G) + 0.182569 \cdot \text{LOG}(\%L)$ | 79.1% |

la cual es el número de individuos o densidad de regeneración.

Las variables de paisaje con mayor aporte significativo después del tratamiento de los datos con el análisis de componentes principales y mayor correlación con la densidad de regeneración fueron: el número de parches, tamaño, forma, dimensión fractal, índice al vecino más próximo, índice de proximidad media y el índice de yuxtaposición. A estas variables se le realizó la prueba de Kolmogorov para determinar la normalidad, determinando que los datos no provienen de una población con una distribución normal. Por consiguiente, se trabajó la prueba no paramétrica Kruskal Wallis para ver si existían diferencias significativas dentro de cada índice, permitiéndonos concluir con este análisis que las variables de la distancia al vecino más próximo en parches de bosque secundario, índice de proximidad media en parches de bosque roble y el índice de yuxtaposición en parches de bosque

plantado son significativamente influyentes (99% de probabilidad) con la densidad de regeneración.

DISCUSIÓN

El análisis de la pendiente en los tres paisajes evaluados de acuerdo con la categorización de INVIAS, reportó una diferencia entre estos, situación que explica una variación marcada entre los promedios de regeneración para cada sitio reportándose el mayor valor en el paisaje con relieve montañoso. Lo anterior corrobora la afirmación hecha por Devia y Arenas (2000), que el roble presenta tendencia a crecer en las partes más altas de las montañas, preferencialmente en áreas escarpadas y laderas con pendientes entre el 30 y 50%. Lo anterior se evidencia en Pisoje donde se presentaron las pendientes más altas y también la mayor densidad de regeneración, en comparación con los otros dos paisajes; reconfirmando lo expuesto por Helmer (2000), quien encontró para bosques de Costa

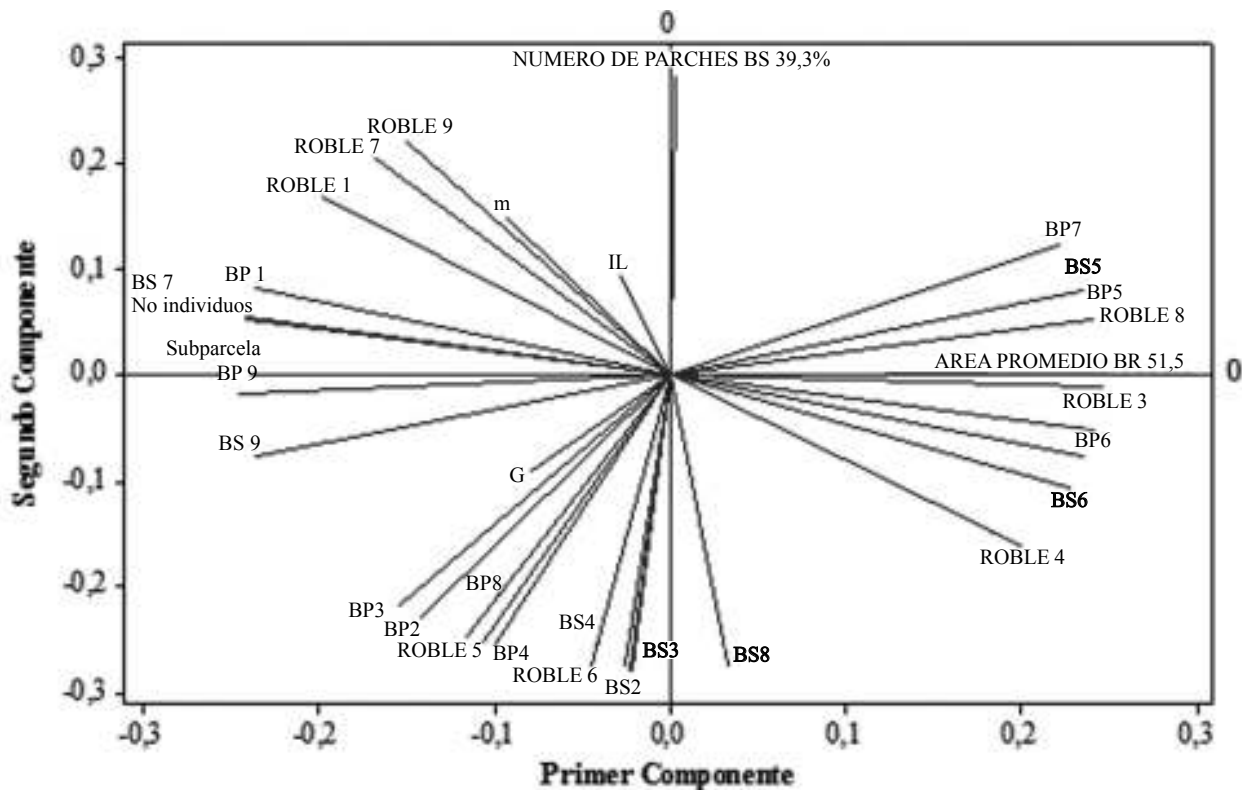


Figura 3. Representación gráfica de los valores de los casos en el espacio de las componentes principales para todas las variables de sitio y de paisaje analizadas. BS: Bosque Secundario, Roble: Bosque de Roble, BP: Bosque Plantado; 1: número de parches, 2: Área promedio, 3: Desviación estándar, 4: forma de los parches, 5: relación área/dimensión, 6: distancia al vecino más próximo, 7: índice de proximidad media, 8 índice de yuxtaposición.

Rica un patrón de mayor cantidad de bosques en restauración asociados a la altitud y la pendiente.

El área basal y el porcentaje de luz son parámetros influyentes en los procesos de regeneración de especies forestales. Sin embargo, la relación de estas dos variables con el número de individuos de regeneración establecida de roble no fue muy clara, es probable que esta situación explique que para esta especie durante las primeras etapas de crecimiento no represento ninguna dificultad el hecho de estar bajo sombra y que el fenómeno que determine la persistencia de las plántulas en el bosque sea la competencia por otros recursos como nutrientes y agua.

En los paisajes con plantaciones forestales comerciales se reportó una mayor densidad de regeneración del *Q. humboldtii* y la correlación entre esta variable y el área de plantaciones en los paisajes fue del 99.5 %; esto pudo deberse a que esta cobertura cumple funciones de corredor biológico permitiendo el flujo de diásporas corroborando así la definición de varios autores (Forman & Godron, 1981, citados por Correa 2000) donde describen a los corredores como “elementos lineales del paisaje cuya fisonomía difiere del ambiente circundante”. Además, en comparación con los pastizales el borde es menos hostil si se considera que esta cobertura no fragmenta el paisaje de igual manera como los potreros y cuando las plantaciones alcanzan una edad avanzada generan un borde propicio para la restauración del bosque y la permanencia de especies propias de él, como lo reporta Rengifo (2001).

Con respecto al tamaño de los parches, las densidades de regeneración de roble más altas se reportaron en fragmentos pequeños, posiblemente debido a que en parches pequeños hay más incidencia de luz para que la regeneración se establezca, aunque se tiene que tener cuidado con esta afirmación ya que se muestrearon individuos entre los 0.30 y 1.5 metros de altura y este estrato reporta una alta productividad y mortalidad de las plántulas y este último fenómeno puede tener una mayor influencia de la matriz que para todos los casos fue de pastos. La forma del parche adquiere un papel importante

ya que entre más complejo sea su forma es menor la densidad de regeneración de roble, esto puede deberse a que cuanto más irregular es la forma de un parche mayor es el área de borde, lo cual tiene grandes implicaciones para la dispersión de semillas y el movimiento de animales (Forman & Godron 1981, Forman 1995).

Se puede decir que la ecología del paisaje es una herramienta que permite asociar la regeneración del roble con las métricas del paisaje, hecho que se sustenta con lo encontrado con relación a las variables de dispersión asociadas al paisaje; lo que permite decir que la regeneración del roble puede estar fuertemente influenciada por la proximidad entre los bosques de roble y los bosques secundarios mixtos cercanos a ellos que permiten de alguna manera la conectividad con otros parches. De esta forma es claro, que entre más juntos estén estos fragmentos de roble mayor será la probabilidad del establecimiento de la regeneración, puesto que cortas distancias ayudan a los dispersores en su función, además que el proceso de dispersión de la semilla del roble es principalmente por borocoria, perjudicando su establecimiento si la cobertura es fragmentada. También es probable que la misma situación ocurra con las plantaciones forestales, las cuales al estar bien distribuidas por todo el territorio, mejoren la conexión entre parches y por ende la regeneración corroborando lo expuesto por Forman (1997) y Rengifo (2001), con relación a la función de los fragmentos en la distribución de especies a lo largo de la matriz, constituyendo áreas de amortiguamiento para hacer frente a posibles extinciones causadas por cambios ambientales. Por otro lado, los parches de bosque de roble de la meseta de Popayán están categorizados como pequeños y muy pequeños, lo que redundo en una alta heterogeneidad paisajística donde sobresalen los bosques de los paisajes más montañosos; estos parches constituyen hábitats y zonas de paso para la dispersión de las especies, desde ellos pueden dispersarse propágulos que pueden permitir la recolonización de nuevas localidades y además mantener poblaciones propias de los ecotonos y favorecer la restauración del bosque (Helmer 2000, Romero 2004).

CONCLUSIONES

El patrón de los tres paisajes indica que estos son fragmentados y la matriz para todos fue de pastos, indicando una predominancia de la actividad de ganadería en las zonas estudiadas. Otra categoría de clasificación que tiene un área importante para los paisajes es la de pastos con rastrojo, evidenciando etapas de sucesión temprana debido a la falta de uso de algunos potreros. En los tres paisajes también se observa el predominio de bosques naturales y plantaciones forestales comerciales; sin embargo en la zona de Clarete se encuentra el mayor núcleo de bosques de roble comparados con las otras dos, los cuales presentan una mayor extensión en plantaciones forestales. Con respecto a los bosques secundarios mixtos existe una similitud para los tres paisajes. Las categorías de cobertura forestal, la de bosque abierto solo se reportó en Pisoje, la cual se caracteriza por la presencia de muchos claros y una fuerte intervención antrópica, evidenciando la práctica de quemas para la expansión agrícola y ganadera. Los rastrojos en los paisajes también tienen algún dominio en términos del área total, debido a que estos incluyen en su clasificación a los rastrojos altos, medios y bajos, lo que sustenta la presencia de terrenos abandonados, o fincas que no están siendo usadas; además de algunos lotes que fueron plantaciones forestales y que han sido convertidos en bosques sucesionales tempranos. Por último, los cultivos que generalmente son de baja intensidad principalmente de autosustento lo componen cultivos de café, maíz y plátano y muy pocos corresponden a proyectos productivos de gran escala.

El paisaje que reportó una mayor área de bosque de roble con 510 ha fue Clarete, este paisaje que abarca 25 km² comprende una buena parte del corregimiento las Piedras conformado por las veredas Clarete, el Cabuyo, las Guacas y San Isidro, siendo las veredas donde se concentran la mayoría de los bosques naturales con predominio de roble del municipio de Popayán.

Con base en las variables de sitio analizadas (área basal, pendiente, porcentaje de luz), se puede predecir la densidad de regeneración del roble *Q.*

humboldtii explicando entre el 79.1% y el 86.3 % de esta, a partir de la utilización de modelos matemáticos generados para este fin.

Se logró establecer una relación entre la densidad de regeneración y las métricas del paisaje, evaluados en paisajes del municipio de Popayán, con lo que se pudo derivar que además de la explicación anterior que fue realizada por su correlación alta, las tres variables con mayor influencia fueron la distancia al vecino más próximo en parches de bosque secundario, índice de proximidad media en parches de bosques de roble y el índice de yuxtaposición en parches de plantaciones forestales. La regularidad perimetral de algunos bosques secundarios y de las plantaciones aledañas, ayudan a la regeneración del *Quercus*, por lo que estas coberturas permiten la conducción o el transporte de materia.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de la Fundación Natura y la Universidad del Cauca para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Correa, A.** 2000. Evaluación de un paisaje fragmentado para la conservación y recuperación de biodiversidad área demostrativa Miraflores-Moropotente, Estela, Nicaragua. Tesis de Maestría. Centro Agronómico Tropical de investigación y Enseñanza, Programa de Enseñanza para el desarrollo y la conservación. Turrialba.
- Devia, C. & H., Arenas** 1996. Evaluación del estatus ecosistémico y de manejo de los Bosques de Fagaceas (*Quercus humboldtii* y *Trigonobalanus excelsus*) en el Norte de la Cordillera Oriental (Cundinamarca, Santander y Boyacá). Desarrollo sostenible en los Andes de Colombia (Provincias del Norte, Gutiérrez y Valdeirrama) Boyacá, Colombia. IDEADE, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
- Forman, R. T. T.** 1995. Land mosaics. The ecology of landscapes and regions. Cambridge University Press. New York. 632 p.
- Forman R. T. T. & M. Godron.** 1981. Patches and structural components for landscape ecology. Bioscience 31: 733-735.

- Helmer, E. H.** 2000. The Landscape Ecology of Tropical Secondary Forest in Montane Costa Rica. *Ecosystems* 3: 98–114.
- Lamprecht, H.** 1990. *Silvicultura en los Trópicos: dinámica de los bosques tropicales húmedos*. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit. Instituto de Silvicultura de la Universidad de Göttingen. Göttingen.
- Moizo M., P.** 2004. La percepción remota y la tecnología SIG: una aplicación en ecología de paisaje. *GeoFocus* 4: 1-24.
- Murcia, C.** 2002. Ecología de la polinización, pp. 493-514. En: Guariguata & Kattan (eds). *Ecología y conservación de bosques Neotropicales*. Universidad Tecnológica de Costa Rica. Costa Rica.
- Rengifo, L. M.** 2001. Effect of natural and anthropogenic landscape matrices on the abundance of subandean bird species. *Ecological Applications* 8: 668-685.
- García R. A.** 1998. El paisaje: una herramienta en el estudio detallado del territorio Kuxulkab'. *Revista de divulgación* 7:22-33.
- Romero, M.** 2004. Análisis de los cambios de la estructura del paisaje de l'Alt Empordà en el periodo 1957-2001. Tesis Doctoral. Geografía en ordenación del territorio y medio ambiente. Universidad de Girona. 45 p.
- Smith, J., C. Sabogal, W. Jong & D. Kaimowitz.** 1997. Bosques secundarios como recurso para el desarrollo rural y la conservación ambiental en los trópicos de América Latina. CIFOR. Occasional Paper No. 13. 36p.

