



ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

CARACTERIZACIÓN FLORÍSTICA DEL BOSQUE MONTANO
Y SUBPÁRAMO DEL VOLCÁN IRAZÚ, COSTA RICAFloristic Characterization of Montane and Subpáramo
Forest in Irazú Volcano, Costa RicaLuis Guillermo ACOSTA-VARGAS¹, Dagoberto ARIAS-AGUILAR^{1,2}, Juan Carlos VALVERDE^{3*}¹. Escuela de Ingeniería Forestal, Tecnológico de Costa Rica; Cartago, Costa Rica. lacosta@itcr.ac.cr². Laboratorio de Ecofisiología Forestal y Aplicaciones Ecosistémicas (ECOPLANT), Tecnológico de Costa Rica; Cartago, Costa Rica, darias@itcr.ac.cr³. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción; Concepción, Chile. jvalverde@udec.cl

*Autor de correspondencia.

Recibido: 30 de septiembre de 2021. Revisado: 01 de julio de 2023. Aceptado: 22 de agosto de 2023.

Editor asociado: Susana Raquel Feldman

Citation/ citar este artículo como: Acosta-Vargas, L.G., Arias-Aguilar, D. y Valverde, J.C. (2024). Caracterización florística del bosque montano y subpáramo del volcán Irazú, Costa Rica. *Acta Biol Colomb*, 29(1), 32-40. <https://doi.org/10.15446/abc.v29n1.97088>

RESUMEN

El Volcán Irazú es uno de los picos más altos de Costa Rica; constituye uno de los pocos sitios con la asociación vegetal conocida como montano y subpáramo. El objetivo de esta investigación consistió en caracterizar la estructura y composición de este ecosistema considerando dos pisos altitudinales (montano y subpáramo). Se establecieron tres parcelas de 1000 m² por tipo de bosque, en las que se desarrolló una identificación botánica, y se midió el diámetro y la altura total de las plantas. En ambos bosques las distribuciones diamétricas se ajustaron al modelo de bosque disetáneos con un área basal de 31,68 m² ha⁻¹ en el bosque montano y 4,67 m² ha⁻¹ en el subpáramo. Respecto a la estructura vertical, el bosque montano alcanzó una altura máxima de 21 m con tres estratos bien definidos; en cambio el subpáramo alcanzó los 8 m y no presentó estratos. Con respecto a los análisis de diversidad se determinó que ambos bosques cuentan con diferencias significativas; en donde el bosque montano presentó 20 especies, mientras que en el subpáramo se identificaron seis especies. *Comarostaphylis arbutoides* es la especie de mayor importancia para ambas comunidades. La conclusión más importante es que el área de estudio se puede considerar una isla altitudinal, que representa un sitio de alto valor para la conservación y la investigación de la comunidad vegetal del subpáramo. La estructura es muy simple en especies, su área muy reducida y es muy vulnerable ante eventos volcánicos, lo cual evidencia su valor de conservación y estudio.

Palabras clave: Ecosistemas de altura, región tropical, biogeografía, similitud florística, sucesión secundaria.

ABSTRACT

Irazú volcano is one of the highest peaks in Costa Rica; it constitutes one of the few sites with the plant association known as montane and sub-paramo. The research aimed to characterize the structure and composition of this ecosystem considering two altitudinal floors (montane and subpáramo). Three 1000 m² plots per forest type were established, in which botanical identification was developed, and diameter and total height were measured. In both forests, the diameter distributions were adjusted to the different forest models with a basal area of 31.68 m² ha⁻¹ in montane forest and 4.67 m² ha⁻¹ in subpáramo forest. Regarding the vertical structure, the montane forest reached a maximum height of 21 m with three well-defined strata; on the other hand, the subpáramo reached 8 m and did not differentiate strata. Regarding the diversity analysis, it was determined that both forests have significant differences; the montane forest reported 20 species, while the subpáramo only had six species. *Comarostaphylis arbutoides* is the most important species for both communities. The most important conclusion is that the study

area can be considered an altitudinal island; it represents a site of high value for the conservation and research of the sub-paramo plant community. The structure is straightforward in species, its area is minimal, and it is very vulnerable to volcanic events, which shows its value for conservation and study.

Keywords: High-altitude ecosystems, tropical region, biogeography, floristic similarity, secondary succession.

INTRODUCCIÓN

La región tropical se caracteriza por poseer una amplia variedad de especies y ecosistemas, aspecto que permite el desarrollo del estudio de distribución de especies, sustentabilidad espacial biológica y dinámica de interacción de comunidades (Körner, 2012; Valverde *et al.*, 2021), características ambientales como la altitud y topografía influyen directamente en la composición florística de los ecosistemas con altitudes superiores a 2000 m (Cuello, 2002; Arzac *et al.*, 2011). La altitud es considerada como un aspecto crítico para entender la distribución espacial de especies, puesto que la riqueza de las especies tiende a disminuir con el aumento de la altitud (Llambí *et al.*, 2013). Se considera que los bosques montanos cuentan con una diversidad muy reducida y con especies de tamaño reducido en comparación los bosques de tipo basal tropical (Rodríguez *et al.*, 2011b; Nuñez *et al.*, 2013).

Sin embargo, el bosque montano y subpáramo tropical han sido poco estudiados debido a su área de cobertura reducida y su uso limitado como fuentes de materia prima de uso comercial (Rada *et al.*, 2011; Bueno y Llambí, 2015); por tanto, la investigación se ha enfocado a aspectos de identificación botánica de las especies (Llambí, 2015). Aspectos como la dinámica de comunidades, adaptabilidad morfológica y fisiológica de las especies a condiciones de estrés ambiental (e.g. hídrico, térmico o radiación) y aspectos fenológicos han sido poco estudiados (Rodríguez *et al.*, 2011a; Morales, 2012). Consecuentemente, la poca información de estas comunidades es alarmante dentro del contexto de cambio climático (Buytaert *et al.*, 2014). No se dispone de suficiente información que permita desarrollar modelos precisos que evalúen la adaptabilidad de las comunidades de especies presentes en bosque montano y subpáramo tropical a distintos escenarios de aumento de temperaturas y reducción en patrones de precipitación (Quesada-Quirós *et al.*, 2017), lo que impide desarrollar estrategias ecológicas y establecer políticas para su conservación (Vargas-Ríos *et al.*, 2022).

Entre los estudios previos en estas comunidades destaca Suárez y Chacón-Moreno (2011), quienes señalaron que los bosques montanos y páramo enfrentan serias amenazas ante el cambio climático, debido al cambio de temperatura, patrón de nubosidad y disponibilidad hídrica, lo que podrían incidir en una reducción de entre el 20 y el 70 % de la diversidad de los ecosistemas para el año 2070. Por su parte, Quesada-Quirós *et al.* (2017) determinaron que la

distribución de las comunidades de altura se vería reducida entre el 20 y 40 % debido al cambio de las condiciones climáticas óptimas para los bosques, lo que generaría un aumento de mortalidad de las especies y pérdida de la diversidad. Esto, complementado con la poca información disponible sobre la composición de ambas comunidades, incidiría en un gran riesgo de pérdida de ecosistemas fundamentales de las regiones altas del trópico.

En el caso específico de Costa Rica se estima que el bosque montano y el subpáramo cubren 152 km² en la Cordillera Volcánica Central y Cordillera de Talamanca (Kappelle y Horn, 2016), representando el 0,4 % del área de bosque de altura tropical y el 90 % del bosque de altura en América Central (Cascante y Estrada, 2001; Hammer *et al.*, 2001). A nivel de especies, ambas comunidades han reportado entre 32 a 59 especies, de las cuales el 35 % son consideradas como endémicas (Kappelle y Horn, 2005), destacando las familias Asteraceae, Poaceae y Cyperaceae (Chaverri-Polini y Cleef, 1996). Por consiguiente, el objetivo del estudio consistió en caracterizar la composición florística del bosque montano y subpáramo en el Parque Nacional Volcán Irazú.

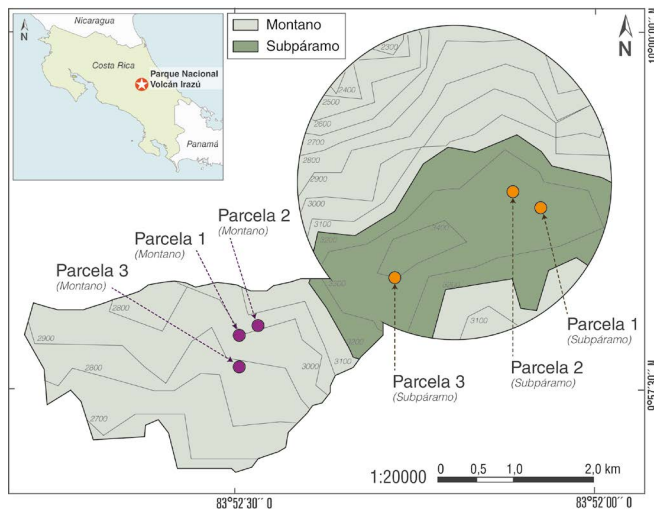
MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El estudio se desarrolló en el bosque montano (extensión de 45 ha) y subpáramo (extensión 9 ha) del Parque Nacional Volcán Irazú, ubicado en la Cordillera Volcánica Central entre las coordenadas 9°57' N - 9°58' N y 83°50' O - 83°52' O. El sitio se caracterizó por tener una temperatura anual que varió entre 3 y 17 °C y una precipitación media anual de 2158 mm (IMN, 2020). Según el sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge *et al.* (1971) el sitio se clasificó como bosque pluvial montano y bosque muy húmedo montano. Para efecto del estudio, las comunidades de bosque montano se consideraron a una altitud de 2300 a 3100 m y para bosque subpáramo de los 3100 a los 3500 m (IMN, 2020).

El área seleccionada para ambos bosques se caracterizó por estar en el área de protección del parque nacional, separados por una distancia superior de 200 m de la red de caminos internos más cercanos y por ser parches de bosque no intervenido. A su vez, presentó una topografía con una pendiente inferior al 40 %, con un suelo franco arcilloso de clasificación Andisol y un pH de 5.2 (Chinchilla *et al.*, 2010).

Figura 1. Área de estudio y la localización de las parcelas de muestreo del bosque montano y subpáramo en el Parque Nacional Volcán Irazú, Costa Rica.



Muestreo de la vegetación

Por cada tipo de bosque se establecieron tres parcelas con un tamaño de 50 × 20 m (área de 1000 m²), subdivididas en cuadrículas de 10 × 10 m; la reducción en el tamaño de estas parcelas se debió a las limitaciones de movilidad asociado a la topografía del sitio (pendientes >40%) y fragilidad del ecosistema al momento de realizar los muestreos. De manera tal la representatividad de este muestreo se validó mediante un análisis de variabilidad, obteniendo una varianza del 7 % en bosque páramo y 5 % en bosque subpáramo, valores inferiores a los recomendados por Cielo-Filho *et al.*, (2011) para la región tropical.

En cada parcela se consideraron los individuos que mostraron un diámetro a altura a pecho (1,3 m sobre nivel de suelo) de superior a 5 cm (valor mínimo considerado para la modelación de la comunidad vegetal a escenarios de cambio climático en MaxEnt según Quesada-Quirós *et al.* (2017)), la altura de cada individuo se midió con una barra telescópica. Además, se colectó una muestra botánica para posteriormente validar la identificación taxonómica con la colección de Herbario Nacional de Costa Rica (ente que custodia las muestras del estudio).

Caracterización estructura horizontal y vertical

En cada bosque se analizó por medio de la distribución diamétrica en intervalos de 5 cm; posteriormente se utilizó el índice de valor de importancia (IVI) para determinar la estructura y carácter de cada bosque para lo cual se estimó: la abundancia (número de individuos reportados por especie con respecto del total), frecuencia (presencia o ausencia

de una especie dentro de las unidades de muestreo con respecto del total) y dominancia (suma de las áreas basales definidas por especies con respecto del total) definidas por Lamprecht (1989). La caracterización de la estructura vertical se desarrolló con la metodología de Lamprecht (1989), en la que se usó la altura mayor de cada bosque y a partir del principio de tercios se generó cada estrato con: un estrato alto (mayor al 2/3 de la altura total), un estrato medio (entre 1/3 y 2/3 de la altura total) y un estrato bajo (menor al 1/3 de la altura total).

Índices de diversidad

Para el análisis de diversidad, en ambos bosques, se emplearon:

Índice de diversidad de Shannon (H_1), índice de equidad utilizado para calcular la suma de probabilidades de las especies, así como para calcular la homogeneidad de la distribución para una cantidad de especies (H_{max}). Hammer *et al.* (2001), indica que este índice toma en cuenta el número de individuos y especies.

Índice de Simpson (1-D), cuantifica la igualdad de la comunidad en cuanto especies.

Índice de dominancia, equivale a 1-Simpson, en el que valores cercanos a cero indican que todas las especies están representadas equitativamente, en cambio valores cercanos a uno indican dominancia de una especie.

Índice de Jaccard (IJ), utilizado para comparar comunidades por medio de presencia y ausencia de especies. Valores cercanos a cero indican que no hay especies compartidas entre comunidades, y valores de uno, cuando los sitios tienen la misma composición de especies (Moreno y Halffter, 2001).

Índice de Morisita-Horn (IM), según Mostacedo y Fredericksen (2000) este es el índice más satisfactorio debido que está influenciado por riqueza de especies y tamaño de la muestra.

Análisis estadístico

Los análisis de estructura vertical y horizontal del bosque se desarrollaron en el programa R versión 3.6.2 (R Core Development Team, 2021), la curva de acumulación de riqueza de cada comunidad se desarrolló con el modelo no paramétrico Chao 1, siguiendo la metodología de Colwell *et al.* (2012). Con respecto a los índices de diversidad se utilizó el software estadístico PAST V3.10 (Hammer *et al.*, 2001). Para el índice de Jaccard, se empleó un análisis multivariado de tipo clúster, con el fin de definir el grado de similitud entre las parcelas evaluadas en bosque montano y páramo y la relación entre ambos bosques. Para todos los análisis empleados se utilizó una significancia de 0,05.

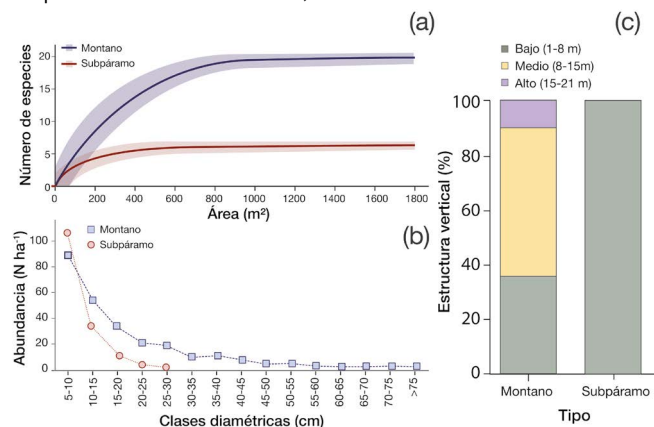
RESULTADOS

Composición florística de las comunidades

La composición florística de la comunidad de bosque montano fue de 20 especies distribuidas en 16 familias, y en el subpáramo, se reportaron seis especies pertenecientes a cinco familias (Fig- 2a, Tabla 1). La curva de riqueza mostró para el bosque montano una estabilización a los 800 m², por su parte con páramo se obtuvo a partir de los 650 m² (Fig. 2a), mostrando que el muestreo empleado fue consistente en su representatividad. De las familias reportadas, únicamente las Apiaceae e Hypericaceae se reportaron en común para ambas comunidades (Tabla 1). Para el bosque montano, las familias con mayor número de especies fueron Ericaceae (tres especies), Araliaceae (dos especies) y Primulaceae (dos especies), las restantes 13 familias estuvieron representadas por una única especie. Para el subpáramo, la familia Ericaceae reportó dos especies y las restantes solo una especie. Dentro de la composición florística, se resalta la importancia de *Comarostaphylis arbutoides*, en ambos tipos de bosque su amplia distribución dentro del gradiente altitudinal (2500-3400 m) es sobresaliente, lo que significa que es una especie que puede ser utilizada como indicadora.

En lo referente a las formas de vida vegetal, los árboles y arbustos son los más abundantes. Para el subpáramo, los árboles representan el 86,9 % de los individuos y los arbustos el 13,1 %. En el bosque montano, los árboles representan el 89,2 % de los individuos y los arbustos el 10,4 %, destacando que la especie *Muehlenbeckia tamnifolia* (Kunth) es la única liana reportada en el estudio con una presencia del 0,4 %.

Figura 2. (a) Curva de acumulación de especies por área de la parcela muestreada (área sombreada corresponde al error estándar), (b) distribución de la abundancia de individuos por hectárea según la clase diamétrica y (c) distribución porcentual de la estructura vertical obtenida en los bosques montano y subpáramo en el Volcán Irazú, Costa Rica.



Estructura horizontal y vertical de las comunidades

Se determinó para el bosque montano un área basal de 31,68 m² ha⁻¹ y para el subpáramo de 4,76 m² ha⁻¹, obteniendo una clara diferencia en el área basal presente en cada bosque (Fig. 2b). Al analizar la distribución diamétrica para ambos bosques, se determinó el mismo comportamiento de decrecimiento del número de individuos por hectárea conforme el diámetro se incrementó, característica propia de bosques tropicales disetáneos. Con respecto a la caracterización diamétrica y densidad poblacional (Fig. 2b), el bosque de subpáramo presentó un diámetro máximo de 30 cm con una densidad de 285,4 tallos ha⁻¹; por su parte, el bosque montano reportó diámetros superiores a los 75 cm con una densidad de 603,3 tallos ha⁻¹.

Con la estructura vertical (Fig. 2c), el bosque montano presentó tres estratos en el dosel bien definidos; un estrato bajo que se desarrolló en los primeros 8 m de altura y en el que se agrupó el 34 % de las especies, un dosel intermedio comprendido entre los 8 y 15 m de altura y que agrupó el 56 % de los individuos del bosque, y finalmente un dosel superior comprendido entre los 15 a 21 m de altura en el que se agrupó el 10 % de los individuos. En cambio, en el bosque de Subpáramo, se obtuvo una altura máxima de 8 m, con la característica de que el bosque no presentó estratos definidos del dosel; aspecto que sería equivalente a que el 100 % de las especies se desarrollaron en un estrato bajo comparado al bosque Montano.

Índices de diversidad

La diversidad alfa estimada para ambos sitios (Tabla 2) mostró para los índices de Shannon, Dominancia y Simpson, una diferencia significativa entre ambas comunidades vegetales, sugiriendo mayor diversidad para el bosque montano debido a la presencia de una mayor cantidad de especies y densidad de individuos por unidad de área. El Índice de Jaccard para diversidad beta mostró que el bosque montano y el subpáramo tienen una similitud del 18,2 %, considerada como baja. Por su parte, el índice de Morisita-Horn indicó una similitud de 0,001 % mostrando una diferenciación significativa entre ambos bosques; aspecto que se validó con el análisis de conglomerados (Fig. 3), en el que dentro del bosque de Subpáramo se mostró una alta homogeneidad entre las parcelas de estudio, en cambio el bosque Montano se mostró una mayor heterogeneidad debido a las condiciones topográficas del sitio en combinación con las actividades volcánicas que generaron una variación en la diversidad de las parcelas.

Tabla 1. Especies reportadas en el estudio y sus valores de abundancia (N), área basal (G), frecuencia (Fr), e índice de valor de importancia (IVI) para las comunidades de bosque montano y subpáramo en el Volcán Irazú.

Familia	Especie	N	G	Fr	IVI
Bosque montano		270	12,67	30,00	
Adoxaceae	<i>Viburnum venustum</i> C.V. Morton	4	0,01	3,00	11,60
Araliaceae	<i>Oreopanax</i> sp.	1	0,01	1,00	3,70
	<i>Oreopanax xalapensis</i> (Kunth) Decne. & Planch.	31	0,42	14,00	61,50
Asteraceae	<i>Senecio oerstedianus</i> Benth.	2	0,02	2,00	7,50
Berberidaceae	<i>Berberis hemsleyi</i> Donn. Sm.	3	0,01	2,00	7,90
Coriariaceae	<i>Coriaria microphylla</i> Poir.	2	0,01	2,00	7,40
	<i>Comarostaphylis arbutoides</i> Lindl.	94	7,54	23,00	171,00
	<i>Vaccinium consanguineum</i> Klotzsch	11	0,07	5,00	21,30
Ericaceae	<i>Vaccinium</i> sp.	2	0,05	1,00	4,50
	<i>Quercus costaricensis</i> Liebm.	54	3,51	25,00	131,10
Melastomataceae	<i>Miconia schnellii</i> Wurdack	1	0,02	1,00	3,90
Myricaceae	<i>Morella cerifera</i> (L.) Small	4	0,03	3,00	11,70
Pinaceae	<i>Pinus radiata</i> D. Don	1	0,01	1,00	3,80
Polygalaceae	<i>Monnina pittieri</i> Chodat	1	0,00	1,00	3,70
Polygonaceae	<i>Muehlenbeckia tamnifolia</i> (Kunth) Meisn.	1	0,00	1,00	3,70
Primulaceae	<i>Ardisia glandulosomarginata</i> Oerst.	5	0,02	4,00	15,30
Rosaceae	<i>Myrsine dependens</i> (Ruiz & Pav.) Spreng.	19	0,21	10,00	42,00
	<i>Holodiscus argenteus</i> (L. f.) Maxim.	13	0,23	5,00	23,30
Scrophulariaceae	<i>Buddleja nitida</i> Benth.	18	0,50	11,00	47,30
Solanaceae	<i>Cestrum irazuense</i> Kuntze	3	0,01	2,00	7,80
Subpáramo		160	1,43	30,00	
Apiaceae	<i>Myrrhidendron donnellsmithii</i> J.M. Coult. & Rose	1	0,00	1,00	4,10
Ericaceae	<i>Comarostaphylis arbutoides</i> Lindl.	108	1,20	18,00	211,80
	<i>Vaccinium consanguineum</i> Klotzsch	17	0,07	7,00	38,80
Hypericaceae	<i>Hypericum irazuense</i> Kuntze ex N. Robson	3	0,01	2,00	9,10
Primulaceae	<i>Myrsine dependens</i> (Ruiz & Pav.) Spreng.	25	0,12	9,00	54,10
Rosaceae	<i>Holodiscus argenteus</i> (L. f.) Maxim.	6	0,02	4,00	18,80

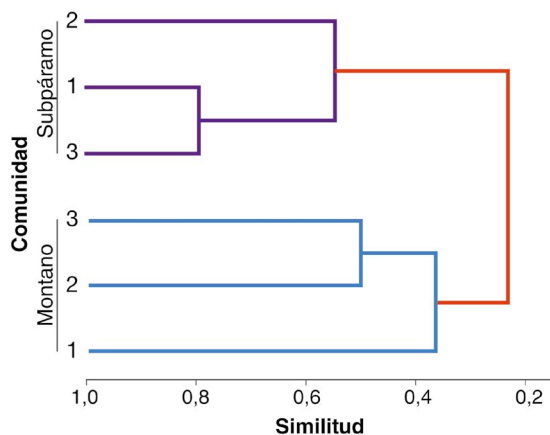


Figura 3. Análisis de conglomerados de similitud de la composición de las parcelas muestreadas en bosque montano y subpáramo en el Volcán Irazú, Costa Rica.

DISCUSIÓN

Estructura de los bosques

Ambos bosques presentaron la misma estructura horizontal de tipo disetáneos, típico de los bosques tropicales según investigaciones desarrolladas por Acosta-Vargas (1998). Con el detalle de que el bosque subpáramo no presenta la misma distribución diamétrica que el bosque montano, y la limitación de que no se presentaron individuos con diámetros superiores a los 30 cm; comportamiento considerado como normal según investigaciones de Berg y Suchi (2001) en bosque del páramo tropical en Ecuador, en el que se ha identificado que las especies presentes en este tipo de ecosistema tiende a tener un diámetro inferior a los 40 cm. Por su parte Suarez y Chacón-Moreno (2011) consideraron que los bosques de altura con un comportamiento disetáneo

Tabla 2. Índices de diversidad alfa obtenidos para las comunidades de bosque montano y subpáramo en el Volcán Irazú, Costa Rica.

Diversidad Alfa	Subpáramo		Montano			
	Límite inferior	Límite superior	Límite inferior	Límite superior		
Número especies	6		20			
Individuos (N ha ⁻¹)	285,4		603,3			
Dominancia (D)	0,49	0,42	0,58	0,19	0,16	0,22
Simpson (1-D)	0,51	0,42	0,58	0,81	0,78	0,84
Shannon (H ₁)	1,02	0,87	1,16	2,09	1,98	2,23

han evidenciado una comunidad en recuperación asociada a una baja intervención humana, lo que ha beneficiado el establecimiento y desarrollo de una importante cantidad de individuos jóvenes que han de permitir una sustitución continua de los árboles y arbustos de mayor edad, siendo considerado como comunidades dinámicas.

Con respecto a la estructura vertical se obtuvieron resultados similares a los presentados por Kappelle y Horn (2005) y Lieberman *et al.* (1996), que reportaron alturas máximas de dosel de 26 m con estratos bien definidos y con una dominancia de individuos en el estrato medio debido a una amplia cantidad de individuos jóvenes y en desarrollo. En cambio, con el bosque de subpáramo identificaron alturas inferiores a los 8 m y sin estructuras claras debido a la gran cantidad de especies arbustivas. Whitmore (1989) y Moreno *et al.* (2011), mencionan que en el subpáramo tropical es común la presencia de especies de la familia Ericaceae, la cual se caracteriza por tener una estructura vertical reducida dado mayoría especies son de porte arbustivo.

Por su parte, Harsch y Bader (2011) mencionan que conforme la altitud es mayor, la cantidad de especies arbóreas que alcanzan alturas superiores a los 20 m se ve significativamente reducida debido a las restricciones fisiológicas e hidráulicas de las especies a climas de menor temperatura, mayor nubosidad y precipitación. Este es un aspecto que Cascante y Estrada (2001) y Llambí (2015) destacan que son las mayores limitantes al momento de caracterizar bosques de altura, ya que tienden a tener una estructura menor ya que las especies dominante tienden a ser arbustivas.

Diversidad identificada

Los bosques montano y páramo del Volcán Irazú presentaron un número de especies bajo, en comparación a bosques de altitudes inferiores en Costa Rica (Acosta-Vargas, 1998). La disminución de la diversidad de especies

arbóreas conforme se asciende en el gradiente altitudinal es concordante con lo reportado en estudios de flora de Costa Rica por Lamprecht (1989), Kappelle *et al.* (1995) y Lieberman *et al.* (1996). Sin embargo, la cantidad de especies identificadas mostró similitud a lo reportado por Ataroff y García-Núñez (2013) en bosques de altura en regiones tropicales, en los que se identificó una baja variedad de especies, debido a las limitaciones de las especies en adaptación a la radiación solar, amplitud térmica diaria y nubosidad presente en altitudes superiores a 3000 m. Este es un aspecto que afecta en especial a las especies arbóreas tropicales (Bueno y Llambí, 2015), ya que la gran mayoría no cuenta con la resistencia suficiente para altitudes superiores de 3000 m.

Estudios desarrollados por Mostacedo y Fredericksen (2000) en bosque de páramo y montano, determinaron que la mayoría de las especies que se desarrollan en páramo tienen un comportamiento arbustivo con alturas inferiores a los 5,0 m con un área foliar reducida, esto con el fin de soportar la radiación y las heladas. Por su parte, en bosque de páramo, Jiménez (2013) determinó una cantidad limitada de especies debido a las condiciones ambientales que en muchos casos afectan la regeneración de especies arbóreas, lo que incide en que las especies arbustivas y de bajo dosel sean las dominantes en el ecosistema. Además, Olaya-Angarita *et al.* (2019), destacan que la limitación en cuanto conectividad de bosque de páramo hace que la diversidad de especies se vea reducida, debido a la limitación generada por la altitud, los dispersores de semilla y las condiciones climáticas ideales para la germinación de las semillas.

Al analizar las especies dominantes de ambos bosques (Tabla 1), se determinó que la especie *Comarostaphylis arbutoides* es la de mayor importancia en ambos ecosistemas según los valores del IVI. Estudios previos de Kappelle y Horn (2005) bosque de subpáramo de la Cordillera de Talamanca en Costa Rica identificaron la dominancia del *C. arbutoides* debido a su plasticidad ecológica que permite desarrollarse en condiciones climáticas adversas. Además, Chaverri-Polini y Cleef (1996), destacaron que la especie muestra capacidad de desarrollar rodales homogéneos en los bosque montano en Costa Rica, dada su capacidad de floración varias veces al año. Por su parte, González-Elizondo *et al.* (2015) recomiendan el monitoreo la especie debido a que las plantas en sus primeros años de vida son susceptibles a cambios abruptos de los regímenes hídricos. Por lo tanto, se puede considerar como una especie clave en la restauración de estos bosques de altura y de la conservación de especies, ya que su comportamiento en el campo es de formación de islas vegetales que funcionan como percha para aves, barreras que atrapan semillas distribuidas por viento y bajo su dosel se desarrolla un microclima apto para otras especies.

En lo referente a las formas de vida vegetales, los árboles y arbustos concentran la mayor abundancia en el bosque montano y representan el 100 % de la abundancia en el

subpáramo. Otra forma de vida reportada para el bosque montano es la liana *M. tamnifolia*, representada por un individuo, lo que corresponde al 0,4 % de la abundancia de ese ambiente. Por lo general, *M. tamnifolia* es una especie de bordes de bosques y caminos. En este caso, por el estado de conservación del sitio ha logrado alcanzar el dosel y desarrollarse a diámetros mayores a 5 cm (Rahbek, 1997). En el sector Prusia del Volcán Irazú se ubica el bosque montano, sector que fue afectado por la erupción de 1965, lo que dio paso al establecimiento de plantaciones forestales en una parte del parque nacional.

Dentro de las especies plantadas está *Pinus radiata* D. Don, especie que también fue registrada en el muestreo. Aunque la abundancia es baja (0,03 %), puede convertirse en invasora por su alta densidad de individuos productores de semilla; y a pesar de su baja regeneración se puede considerar que está en fase de retardo, situación que puede explicarse por las barreras que impiden su propagación como lo es la ausencia natural de micorrizas en el suelo, la ausencia de fuego o interacciones con la fauna. En el caso de micorrizas y la interacción con fauna, éstas han sido reportadas como responsables de invasiones de pinos en Argentina (Nuñez *et al.*, 2013).

Implicaciones del cambio climático la composición del bosque montano y subpáramo

Los modelos ecológicos actuales predicen cambios espaciales de gran parte de las poblaciones, con alteraciones en su ciclo fenológico e incremento de la tasa de mortalidad, siendo la región tropical la más susceptible a sequías (Rodríguez *et al.*, 2011a). El bosque montano y el subpáramo son considerados comunidades con nichos específicos que se han adaptado a condiciones de baja temperatura, aspecto que podría incidir en que sus rasgos fisiológicos (ejemplo: fotosíntesis, transpiración y distribución del carbono), restrinjan su plasticidad al incremento de temperatura y afecten significativamente su supervivencia (Buytaert *et al.*, 2014). Es fundamental disponer de información de la composición florística de estas comunidades y caracterizar las especies a nivel fisiológico y biológico, para mejorar los modelos de predicción climática e identificar especies vulnerables a cambio climático que deban ser incluidas en programas de conservación y evitar su extinción, para que no su ausencia o disminución no genere una pérdida de la sustentabilidad de las comunidades (Kappelle y Horn, 2016).

CONCLUSIONES

El bosque montano y subpáramo del Volcán Irazú cuentan con un área reducida. Al analizar la distribución diamétrica de las especies en ambos bosques se ajustaron al modelo de bosques disetáneos con un área basal en el bosque montano de 31,68 m² ha⁻¹ y 4,67 m² ha⁻¹ en el subpáramo. En la estructura vertical, el bosque montano

alcanzó una altura máxima de 21 m con tres estratos bien definidos; en cambio el subpáramo alcanzó los 8 m y no diferenció estratos.

Con respecto a la cantidad de especies identificadas, el bosque montano reportó 20 especies, mientras el subpáramo solamente seis especies. La especie *Comarostaphylis arbutoides*, mostró la mayor dominancia y adaptabilidad altitudinal, en ambos boques por lo que se puede considerar una especie indicadora del desarrollo del ecosistema y el grado de intervención. Por la cercanía de sectores aledaños al parque hay riesgo de invasión de especies, como se demostró en este estudio con la especie *Pinus radiata*.

PARTICIPACIÓN DE AUTORES

L.G.A, D.A: Diseño del experimento. L.G.A: colección de la información. D.A: Administración de proyecto. J.C.V: Análisis de datos y resultados. Todos los autores colaboraron en la redacción y corrección del manuscrito, a su vez que aprobaron la versión final.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación del Tecnológico de Costa Rica por el financiamiento del proyecto de investigación “Efecto del cambio climático sobre el patrón de distribución de las especies de plantas en el Parque Nacional Volcán Irazú (PNVI) basado en simulaciones a mediano y largo plazo”, al personal del PNVI por su apoyo, y a los revisores anónimos que dieron sus aportes a este artículo.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

REFERENCIAS

- Acosta-Vargas, L. G. (1998). Análisis de la composición florística y estructura para dos tipos de bosque según gradiente altitudinal en la Zona Protectora la Cangreja.
- Arzac, A., Chacón-Moreno, E., Llambí, L. D. y Dulhoste, R. (2011). Distribución de formas de vida de plantas en el límite superior del ecotono bosque-páramo en los Andes Tropicales. *Ecotrópicos*, 24(1), 26-46.
- Ataroff, M. y García-Núñez, C. (2013). Selvas y bosques nublados de Venezuela. *Recorriendo el paisaje vegetal en Venezuela*, 125-155.
- Berg, A. y Suchi, S. (2001). La vegetación de los páramos La Aguada, La Fría y Espejo en los Andes venezolanos.
- Bueno, A. y Llambí, L. D. (2015). Facilitation and edge effects influence vegetation regeneration in old-fields at the tropical Andean forest line. *Applied Vegetation Science*, 18(4):613-623. <https://doi.org/10.1111/avsc.12186>

- Buytaert, W., Sevink, J. y Francisco, F. (2014). *Cambio climático: la nueva amenaza para los páramos*. Editorial Condesan, Lima, Perú, 508-525.
- Cascante, M. y Estrada, A. (2001). Composición florística y estructura de un bosque húmedo premontano en el Valle Central de Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 49(1):213-225.
- Chaverri-Polini, A. y Cleef, A. (1996). Las comunidades vegetacionales en los páramos de los macizos de Chirripo y Buena Vista, Cordillera de Talamanca, Costa Rica. *Revista Forestal Centroamericana*, 17(5):44-50.
- Chinchilla, M., Mata, R. y Alvarado, A. (2010). Caracterización y clasificación de algunos Ultisoles de la región de Los Santos, Talamanca, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 35(1):59-81. <https://doi.org/10.15517/rac.v35i1.6687>
- Cielo-Filho, R., Gneri, M.A. y Martins, F.R. (2011). Sampling precision and variability of tree species abundance ranks in a semideciduous Atlantic forest fragment. *Community Ecology*, 12:188-195. <https://doi.org/10.1556/ComEc.12.2011.2.6>
- Colwell, R. K., Chao, A., Gotelli, N. J., Lin, S. Y., Mao, C. X., Chazdon, R. L. y Longino, J. T. (2012). Models and estimators linking individual-based and sample-based rarefaction, extrapolation and comparison of assemblages. *Journal of Plant Ecology*, 5(1):3-21. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtr044>
- Cuello, N. (2002). Altitudinal changes of forest diversity and composition in the Ramal de Guaramacal in the Venezuelan Andes. *Ecotrópicos*, 15(2):160-176.
- González-Elizondo, M., González-Elizondo, M. S. y Zamudio, S. (2015). *Comarostaphylis arbutoides* (Ericaceae) in central and western Mexico. *Acta botánica mexicana*, (111):47-59. <https://doi.org/10.21829/abm111.2015.181>
- Hammer, Ø., Harper, D. A. y Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia electronica*, 4(1): 9.
- Harsch, M. A. y Bader, M. Y. (2011). Treeline form—a potential key to understanding treeline dynamics. *Global Ecology and Biogeography*, 20(4):582-596. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00622.x>
- Holdridge, L. R., Grenke, W., Hatheway, W.H., Liang, T. y Tosi, J.A. (1971). *Forest Environments in Tropical Life Zones: A Pilot Study*. Pergamon Press, Oxford. 42.
- IMN (Instituto Meteorológico Nacional). (02 de abril de 2020). Historical Data of Weather in Costa Rica. <https://www.imn.ac.cr>
- Jiménez, D. (2013). *Estructura poblacional y nicho de establecimiento de especies leñosas del arbustal paramero en áreas en sucesión secundaria*. [Tesis]. Universidad de los Andes de Venezuela.
- Kappelle, M. y Horn, S. P. (2005). *Páramos de Costa Rica*. Editorial INBio.
- Kappelle, M., Van Uffelen, J. G. y Cleef, A. M. (1995). Altitudinal zonation of montane Quercus forests along two transects in Chirripó National Park, Costa Rica. *Vegetatio*, 119:119-153. <https://doi.org/10.1007/BF00045594>
- Kappelle, M. y Horn, S. P. (2016). *The Páramo Ecosystem of Costa Rica's Highlands*. in M. Kapelle, ed. Costa Rican ecosystems. The University of Chicago Press, Chicago Ill. <https://doi.org/10.7208/chicago/9780226121642.003.0015>
- Körner, C. (2012). *Alpine treelines: functional ecology of the global high elevation tree limits*. Springer Science & Business Media. p.1-10. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-0396-0_1
- Lamprecht, H. (1989). Silviculture in the tropics. Tropical forest ecosystems and their tree species-possibilities and methods for their long-term utilization.
- Lieberman, D., Lieberman, M., Peralta, R. y Hartshorn, G. S. (1996). Tropical forest structure and composition on a large-scale altitudinal gradient in Costa Rica. *Journal of Ecology*, 84(2):137-152. <https://doi.org/10.2307/2261350>
- Llambí, L. D. (2015). Estructura, diversidad y dinámica de la vegetación en el ecotono bosque-páramo: revisión de la evidencia en la cordillera de Mérida. *Acta biológica colombiana*, 20(3):5-19. <https://doi.org/10.15446/abc.v20n3.46721>
- Llambí, L. D., Puentes Aguilar, J. y García-Núñez, C. (2013). Spatial relations and population structure of a dominant tree along a treeline ecotone in the Tropical Andes: interactions at gradient and plant-neighbourhood scales. *Plant Ecology & Diversity*, 6(3-4):343-353. <https://doi.org/10.1080/17550874.2013.810312>
- Morales, N. (2012). Modelos de distribución de especies: Software Maxent y sus aplicaciones en Conservación. *Revista Conservación Ambiental*, 2(1), 1-5.
- Moreno, C. E., Barragán, F., Pineda, E. y Pavón, N. P. (2011). Reanálisis de la diversidad alfa: alternativas para interpretar y comparar información sobre comunidades ecológicas. *Revista mexicana de biodiversidad*, 82(4):249-1261. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2011.4.745>
- Moreno, E. y Halffter, G. (2001). Métodos para medir la biodiversidad. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. *Oficina Regional de Ciencia y Tecnología para América Latina y el Caribe, UNESCO*, 86.
- Mostacedo, B. y Fredericksen, T. (2000). *Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal* (Vol. 87). Proyecto de Manejo Forestal Sostenible (BOLFOR) Santa Cruz, Bolivia.
- Núñez, M. A., Hayward, J., Horton, T. R., Amico, G. C., Dimarco, R. D., Barrios-García, M. N. y Simberloff, D. (2013). Exotic mammals disperse exotic fungi that promote invasion by exotic trees. *PLoS one*, 8(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066832>
- Olaya-Angarita, J. A., Díaz-Pérez, C. N. y Morales-Puentes, M. E. (2019). Composición y estructura de la transición

- bosque-páramo en el corredor Guantiva-La Rusia (Colombia). *Revista de Biología Tropical*, 67(4):755-768. <https://doi.org/10.15517/rbt.v67i4.31965>
- Quesada-Quirós, M., Acosta-Vargas, L. G., Arias-Aguilar, D. y Rodríguez-González, A. (2017). Modelación de nichos ecológicos basado en tres escenarios de cambio climático para cinco especies de plantas en zonas altas de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 14(34): 01-12. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v14i34.2991>
- R Core Development Team. (2021). R (Versión 3.6.2). Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Rada, F., García-Núñez, C. y Rangel, S. (2011). Microclimate and regeneration patterns of *Polylepis sericea* in a treeline forest of the Venezuelan Andes. *Ecotrópicos*, 24(1):113-122.
- Rahbek, C. (1997). The relationship among area, elevation, and regional species richness in neotropical birds. *The American Naturalist*, 149(5):875-902.
- Rodríguez, A., Monro, A. K., Chacón, O., Solano, D., Santamaría, D., Zamora, N., González, F. y Correa, M. (2011a). Regional and global conservation assessments for 200 vascular plant species from Costa Rica and Panama. *Phytotaxa*, 21, 1-216. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.21.1.1>
- Rodríguez, E., Schwarzkopf, T., Gámez, L., Dugarte, W. y Dulhoste, R. (2011b). Canopy structure and woody species distribution at the upper treeline in the Venezuelan Andes. *Ecotrópicos*, 24(1):47-59.
- Suarez, P. y Chacón-Moreno, E. (2011). Modelo espacial de distribución del ecotono bosque-páramo en Los Andes venezolanos. Ubicación potencial y escenarios de cambio climático. *Ecotrópicos*, 24(1):3-25.
- Valverde, J. C., Arias, D., Castillo, M. y Torres, D. (2021). Relación de la variabilidad climática con el crecimiento diamétrico de ocho especies arbóreas de bosque seco en Costa Rica. *Ecosistemas*, 30(1):2092-2092. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2092>
- Vargas-Ríos, O., León, O. y Rojas-Botero, S. (2022). *Protocolo para el monitoreo de la restauración ecológica en los páramos*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 22-32.
- Whitmore, T. (1989). Tropical forest nutrients, where do we stand? A tour de horizon.