

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

Centro de Investigación en Innovación Forestal (CIF)

**Informe final de proyecto
Documento 1**

**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**

MAP. Luis Guillermo Acosta Vargas
Dr. Dagoberto Arias Aguilar

**Vicerrectoría de Investigación y Extensión
2016**

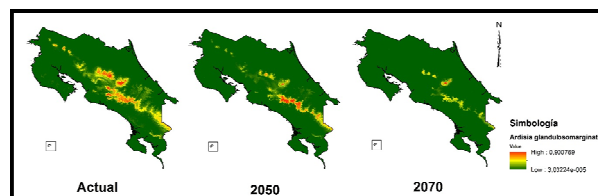


Tabla de contenido

1	Información general	4
1.1	Código y Título del proyecto	4
1.2	Investigadores	4
2	Resumen	5
3	Introducción	7
4	Marco Teórico	10
5	METODOLOGIA	14
5.1	Abordaje metodológico para los objetivos 1 y 2	14
5.1.1	Área de estudio	14
5.1.2	Especies a evaluar.....	14
5.1.3	Fuentes de información	15
5.1.4	Manejo de la información.....	15
5.1.5	Área de distribución potencial de las especies	16
5.1.6	Información climática.....	16
5.1.7	Simulaciones de cambio climático	18
5.1.8	Criterios iniciales de escogencia para establecer parcelas permanentes (PPM) 19	
5.2	Abordaje metodológico para el objetivo 3.....	21
5.3	Abordaje metodológico objetivo 4	21
6	Resultados	23
6.1	Capítulo 1.....	23
6.1.1	Artículo 1. Bosques en el gradiente altitudinal del PNVI, sometido a la Revista Bosque.....	23
6.1.2	Artículo 2: Modelación de 47 especies nativas.	39
6.1.3	Artículo 3: Modelación de nichos ecológicos	52
6.2	Capítulo 2.....	53
6.2.1	Modelaciones de 7 especies con potencial invasor	53
6.3	Capítulo 3.....	57
6.3.1	Libro: Flora del macizo del Irazú	57
6.3.2	Artículo 1: Descripción de dos comunidades boscosas en el gradiente altitudinal del Parque Nacional Volcán Irazú, Costa Rica.	64

6.3.3	Artículo 2: Efecto del cambio climático en la flora del Parque Nacional Volcán Irazú (PNVI), Costa Rica basado en modelaciones a mediano y largo plazo mediante MaxEnt	64
6.3.4	Artículo 3: Modelación de nichos ecológicos basado en tres escenarios de cambio climático para cinco especies de plantas en zonas altas de Costa Rica.....	65
6.3.5	Participación en XVIII Congreso de Ciencia, Tecnología y Sociedad.....	66
6.3.6	Participación: 60 aniversario del Parque Nacional Volcán Irazú	66
6.3.7	Exposición en Comité Técnico Parque Nacional Volcán Irazú	67
6.3.8	Taller Maestría.....	67
6.3.9	Giras Curso Hidrología Forestal.....	67
6.3.10	Taller Técnico.....	67
7	Anexos.....	68

1 Información general

1.1 Código y Título del proyecto

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

Código VIE: 5402-1401-1031

1.2 Investigadores

Nombre y grado	Dirección electrónica
Dr. Dagoberto Arias Aguilar, Ph. D. *	darias@itcr.ac.cr
Luis Guillermo Acosta, MAP	lacosta@itcr.ac.cr
Alexander Rodríguez Gonzalez, M. Sc.	alex.aiphanes@gmail.com
Mario Quesada Quirós, estudiante	mariofgm@gmail.com

*Investigador responsable

2 Resumen

Actualmente son escasos los estudios sobre las modelaciones a mediano y largo plazo y es incierto si las especies de plantas en nuestro país, o al menos en algunos ecosistemas específicos, serán capaces de evolucionar y adaptarse a tiempo al cambio climático. Pocos estudios en Costa Rica dan seguimiento a estos efectos, a pesar que se poseen espacios geográficos muy particulares para llevar a cabo estudios sobre el impacto del cambio climático en las poblaciones naturales. Uno de estos espacios es el Parque Nacional Volcán Irazú (PNVI), un área protegida que resguarda el volcán activo más alto de Costa Rica, mantiene uno de los pocos reductos de vegetación de páramo presentes en nuestro país, preserva los sitios de origen de varias cuencas hidrográficas, abriga varias zonas de vida del país y es una importante zona de protección de flora y fauna, que incluye al menos nueve especies de plantas endémicas de Costa Rica. El presente estudio estableció 10 parcelas de medición permanentes dentro del PNVI, dentro de un sistema montañoso que reúne características muy particulares que la convierten en un sitio ideal para monitorear el efecto del cambio climático sobre el patrón de distribución de sus especies de plantas. Adicionalmente, los ciclos fenológicos en las plantas se están viendo significativamente afectados; un cambio previsto es el predominio de "malas hierbas" o especies oportunistas a expensas de la escasez de especies con más exigencias ecológicas; también, ya se registran migraciones altitudinales de especies y se proyectan extinciones locales a un plazo muy corto. Se ha considerado que "las temperaturas globales previstas para los próximos siglos, puede poner en marcha un nuevo evento de extinción masiva", donde más del 50% de las especies de animales y plantas podrían extinguirse. Este trabajo atendió como objetivo principal la evaluación del efecto del cambio climático sobre el patrón de distribución de las especies de plantas presentes en el Parque Nacional Volcán Irazú, basado en simulaciones a mediano y largo plazo". Este objetivo se cumplió satisfactoriamente mediante las simulaciones en el patrón de distribución de 47 especies de plantas presentes en el PNVI, en función del cambio climático, lo que permitió valorar su riesgo de extinción local, capacidad de desplazamiento o adaptación a las nuevas condiciones climáticas; también se valoró la probabilidad de ingreso al PNVI, por cambios en los patrones del clima, de especies de plantas actualmente consideradas como arvense, evaluando al menos 10 taxones distintos que en el presente no se encuentran pero tienen alto potencial de inserción en el sitio. Finalmente el proyecto define acciones a seguir en procura de mitigar el efecto del cambio climático en el patrón de distribución de las especies de plantas presentes en el PNVI, donde la principal recomendación es que el Parque, realice el pago de los terrenos que aún no han sido despropiados en el sector sureste; ya que según la modelaciones realizadas es en este sector donde se concentra el nicho potencial para las especies modeladas. Dar seguimiento a las especies *Crassocephalum crepidioides*, *Rumex obtusifolius*, *Ulex europaeus*, *Achillea millefolium* y *Ranunculus repens*, como especies con

potencial de invadir las áreas del PNVI. Un producto a resaltar aparte de las publicaciones científicas, es un libro sobre la flora en la PNVI.

Palabras clave: Cambio Climático, Parque Nacional Volcán Irazú, distribución de especies; MaxEnt, simulación.

3 Introducción

El clima de nuestro planeta está sufriendo importantes alteraciones desde hace varias décadas. El 5º Informe del Grupo Intergubernamental de Cambio climático (IPCC) indica que el calentamiento del sistema climático es inequívoco y que se debe principalmente al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) provocado por actividades humanas como el uso intensivo de combustibles fósiles, el gas o el carbón, la descomposición de residuos urbanos o ganaderos y los cambios en el uso de la tierra como consecuencia.

El incremento de la temperatura sobre la tierra prevé impactos muy significativos a nivel global, incluyendo cambios en la cantidad y en la ubicación de las precipitaciones, aumento en el nivel de los océanos, incremento en la frecuencia y gravedad de fenómenos meteorológicos extremos como inundaciones, olas de frío y calor, huracanes y tifones, cambios en la cota de nieve de las montañas, efectos negativos en los rendimientos agrícolas, extinción de ecosistemas y especies, incrementos del rango de los vectores de enfermedades, efectos adversos para la salud en los lugares de temperaturas cálidas, entre otros.

En la actualidad están desapareciendo especies de montañas altas, las que son incapaces de adaptarse a los cambios climatológicos de sus hábitats. Numerosas poblaciones costeras están bajo amenaza ante el crecimiento del nivel del mar, fruto del derretimiento de grandes masas de hielo y el aumento de la temperatura del mar. Los ciclos de vida de muchas especies de plantas y animales silvestres están estrechamente vinculados con el paso de las estaciones. Inviernos suaves podrían afectar a muchos mamíferos o insectos que disminuyen su actividad, evitando su entrada en hibernación o letargo durante estos períodos en los que la comida es escasa y en el que perecerán por hambruna. Los ciclos fenológicos en las plantas se están viendo significativamente afectados; un cambio previsto es el predominio de "malas hierbas" o especies oportunistas a expensas de la escasez de especies con más exigencias ecológicas; también, ya se registran migraciones altitudinales de especies y se proyectan extinciones locales a un plazo muy corto. Se ha considerado que " las temperaturas globales previstas para los próximos siglos, puede poner en marcha un nuevo evento de extinción masiva", donde más del 50% de las especies de animales y plantas podrían extinguirse.

Se pronostica que entre los ecosistemas más vulnerables al cambio climático están las islas en el sentido amplio (islas edáficas y ecosistemas en cumbres de montañas altas), así como los ecotonos (zonas de contacto entre dos o más sistemas o llámese zonas transicionales) y los ecosistemas de ribera. A nivel de especies, tres respuestas generales podrían tener lugar debido al cambio climático: desplazamiento, adaptación o extinción local.

Actualmente es incierto si las especies de plantas en nuestro país, o al menos en algunos ecosistemas específicos, serán capaces de evolucionar y adaptarse a tiempo al cambio climático. Pocos estudios en Costa Rica dan seguimiento a estos efectos.

Costa Rica posee espacios geográficos muy particulares para llevar a cabo estudios sobre el impacto del cambio climático en las poblaciones naturales. Uno de estos espacios es el Parque Nacional Volcán Irazú (PNVI), un área protegida que resguarda el volcán activo más alto de Costa Rica, mantiene uno de los pocos reductos de vegetación de páramo presentes en nuestro país, preserva los sitios de origen de varias cuencas hidrográficas, abriga varias zonas de vida del país y es una importante zona de protección de flora y fauna, que incluye al menos nueve especies de plantas endémicas de Costa Rica.

En Costa Rica no se ha realizado una monografía formal y extensa que evalúe de manera sistemática, objetiva y con el uso herramientas modernas el efecto del cambio climático sobre el patrón de distribución de las especies de plantas.

Para efectos de los métodos utilizados, el PNVI es un sistema montañoso que reúne características muy particulares que la convierten en un sitio ideal para monitorear el efecto del cambio climático sobre el patrón de distribución de sus especies de plantas. Por otro lado, el uso de herramientas informáticas para realizar predicciones de distribución potencial de especies constituye una técnica moderna e importante en biología analítica y se aplicaron los principios más recientes.

Bajo las anteriores premisas y de manera consecuente con las prioridades de investigación de la Escuela de Ingeniería Forestal se planteó este proyecto, el cual postula como objetivo principal “Evaluar el efecto del cambio climático sobre el patrón de distribución de las especies de plantas presentes en el Parque Nacional Volcán Irazú, basado en simulaciones a mediano y largo plazo”. Los resultados obedecen al logro de 4 objetivos específicos: 1. Simulaciones utilizando el software MaxEnt que proyectaron la variación en el patrón de distribución de 47 especies de plantas presentes en el PNVI, a mediano y largo plazo por efecto del cambio climático; 2. posibilidad del ingreso al PNVI, por efecto del cambio climático, de especies de plantas actualmente consideradas como arvenses; 3. definición de las acciones a seguir en procura de mitigar el efecto del cambio climático en el patrón de distribución de las especies de plantas presentes en el PNVI y; 4. Divulgación de los resultados obtenidos en instituciones del Estado, tomadores de decisiones y en el público general mediante publicaciones científicas, talleres y congresos.

La metodología consideró el establecimiento de 10 parcelas de medición y la utilización del programa MaxEnt3.3.3k, utilizado para el modelamiento de especie. Este software funciona con algoritmos que predicen el potencial de distribución de las especies con relación a condiciones ambientales conocidas y recopiladas en el tiempo (Phillips, Anderson y

Schapire, 2006) y se considera como uno de los programas más eficientes en dichas predicciones (Elith et al., 2006). Se calibró con las siguientes especificaciones para todos los casos: con los puntos de ocurrencia de visitas de campo y herbarios, el 75% de las ocurrencias para el entrenamiento del modelo y el 25% restante para realizar su respectiva validación, según sugieren varios autores (Alba-Sánchez et al, 2010). Además, se configuró con un umbral de convergencia de 0,00001 y como límite superior de corrida un valor de 10000 interacciones según recomienda Phillips et al, (2006). Para la visualización y configuración de las capas y mapas generados, se utilizó ARCGIS 10.2 y QGIS 2.8.

La decisión de utilizar el MaxEnt se basó en al menos tres aspectos: es un software de uso libre ampliamente utilizado para los mismos propósitos, trabaja con pocas ocurrencias de especies (al menos 20) y trabaja con datos de presencia en comparación con otras aplicaciones que requieren más información.

La información sobre las variables climáticas se obtuvo de Worldclim (Hijmans, Cameron, Parra, Jones & Jarvis, 2005) con una resolución espacial de 0.93 x 0.93 km equivalente a 0.86 kilómetros cuadrados. Todas las capas fueron modificadas al tamaño de Costa Rica para su análisis con el programa MaxEnt. Se utilizaron los escenarios climáticos de trayectorias de concentración representativas (RCP) 4.5 (estabilización) con predicciones realizadas al 2050 (promedio entre los años 2041-2060) y el 2070 (promedio entre los años 2061-2080). Presentar la naturaleza y alcance del problema investigado.

4 Marco Teórico

El cambio climático corresponde al cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos comparables. El clima de nuestro planeta está sufriendo importantes alteraciones desde hace varias décadas. El 5° Informe de Grupo Intergubernamental de Cambio climático (IPCC) indica que el calentamiento del sistema climático es inequívoco y que se debe principalmente al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) provocado por actividades humanas como el uso intensivo de combustibles fósiles, el gas o el carbón, la descomposición de residuos urbanos o ganaderos y los cambios en el uso de la tierra como consecuencia. Existen pruebas irrefutables de este cambio. La temperatura de la atmósfera a nivel superficial ha sufrido un calentamiento progresivo desde el comienzo de la era industrial hasta nuestros días de 0,6 °C (IPCC 2007; Ugalde 2009).

El incremento de la temperatura sobre la tierra prevé impactos o fenómenos muy significativos a nivel global, incluyendo cambios en la cantidad y en la ubicación de las precipitaciones, lo que implicaría graves inundaciones o efectos de sequía, aumento en el nivel de los océanos, incremento en la frecuencia y gravedad de fenómenos meteorológicos extremos como inundaciones, olas de frío y calor, huracanes y tifones, cambios en la cota de nieve de las montañas, efectos negativos en los rendimientos agrícolas, extinción de ecosistemas y especies, incrementos del rango de los vectores de enfermedades, efectos adversos para la salud en los lugares de temperaturas cálidas, entre otros (Ugalde 2009; Velladares et al. 2005).

Estimaciones proyectan el aumento en el nivel del mar de unos 180 y 590 milímetros entre el 2090-2100 en relación con 1980-1999, además, consecuencias importantes en la agricultura, reducción de la capa de ozono, disminución del pH de los océanos, y propagación de enfermedades como la malaria y la fiebre del dengue. Entre 1970 y 2004 se han duplicado de manera global el número de huracanes calificados con la máxima categoría de fuerza, aumento atribuible principalmente a esta distorsión en el clima.

En la actualidad están desapareciendo especies de montañas altas, las que son incapaces de adaptarse a los cambios climatológicos de sus hábitats. Numerosas poblaciones costeras están bajo amenaza ante el crecimiento del nivel del mar, fruto del derretimiento de grandes masas de hielo y el aumento de la temperatura del mar. Los ciclos de vida de muchas especies de plantas y animales silvestres están estrechamente vinculados con el paso de las estaciones. Inviernos suaves podrían afectar a muchos mamíferos o insectos que disminuyen su actividad en esta época, evitando su entrada en hibernación o letargo durante estos períodos en los que la comida es escasa y en el que perecerán de hambruna. Los ciclos fenológicos en las plantas se están viendo significativamente afectados; un cambio previsto

es el predominio de "malas hierbas" o especies oportunistas a expensas de la escasez de especies con más exigencias ecológicas; también, ya se registran migraciones altitudinales de especies y se proyectan extinciones locales a un plazo muy corto (Ugalde 2009; Velladares et al. 2005).

Luego de estudiar la asociación entre el clima de la tierra y las extinciones en los últimos 520 millones de años, se ha considerado que " las temperaturas globales previstas para los próximos siglos, puede poner en marcha un nuevo evento de extinción masiva", donde más del 50% de las especies de animales y plantas podrían extinguirse. Otros estudios más recientes predicen la extinción de entre un 18% y un 35% de una muestra de 1,103 animales y plantas para el 2050, basado en las proyecciones futuras del clima. Todo ello está ocurriendo ya, pero se prevé un agravamiento de la situación a largo plazo, ya que se considera que a final del siglo XXI la temperatura media de la atmósfera a nivel superficial aumentaría entre 1,1 y 6,4°C. Se esperan extinciones importantes o cambios en la distribución y abundancia de las especies, donde las zonas montañosas de alta elevación, como las cumbres volcánicas, podrían resultar entre los ecosistemas más sensibles debido a que muchas especies no tendrían posibilidad de lograr migraciones altitudinales. Las plantas y animales que precisan dichas cumbres verán su hábitat limitado o extinto (Ugalde 2009; Velladares et al. 2005).

Costa Rica es un país con gran diversidad de ecosistemas y especies, muchos de ellos únicos y todos proporcionando un amplio número de bienes y servicios. Sin embargo, se prevé que actualmente muchos de estos ecosistemas están severamente amenazados por el cambio climático a un corto plazo. En particular, se pronostica que entre los ecosistemas más vulnerables al cambio climático están las islas en el sentido amplio (islas edáficas y ecosistemas en cumbres de montañas altas), así como los ecotonos (zonas de contacto entre dos o más sistemas o llámese zonas transicionales) y los ecosistemas de riberas (Ugalde 2009; Velladares et al. 2005).

A nivel de especies, tres respuestas generales podrían tener lugar debido al cambio climático: desplazamiento, adaptación o extinción local (Holt 1990; Peterson et al. 2001; citado por Mijail et al. 2009). Los desplazamientos abruptos inducidos de las distribuciones de las especies pueden conducir al aumento de las tasas de extinción, así como a modificaciones significativas de la fenología y la fisiología de las especies (Parmesan & Yohe 2003; citado por Mijail et al. 2009). Por otro lado, algunos científicos pronostican de que si las especies son suficientemente móviles, podrían rastrear la localización geográfica de sus nichos ecológicos; o si las especies son capaces de sufrir un cambio evolutivo rápido o tienen una amplia gama de tolerancia fisiológica, entonces podrían ajustarse a los cambiantes condiciones ecológicas y de paisajes (Broennimann et al. 2006; Harrison et al. 2006; citado por Mijail et al. 2009).

En Costa Rica, encontramos que el Parque Nacional Volcán Irazú (PNVI) resguarda el volcán activo más grande y de mayor altitud de Costa Rica, con una elevación máxima de 3432 msnm. Es un área protegida que abarca una extensión de 2000,39 ha, constituida principalmente por bosques primarios y secundarios.

Este parque se localiza sobre la Cordillera Volcánica Central, en la provincia de Cartago, cantón de Oreamuno, y abarca parte de los distritos de Santa Rosa, Potrero Cerrado, Tierra Blanca y Llano Grande. Corresponde a uno de los parques nacionales más visitados por su fácil acceso, riqueza biológica y belleza escénica. La cumbre del volcán tiene cuatro cráteres en la cima, el principal, otro llamado Diego de la Haya y dos más pequeños en la zona sureste del parque. La temperatura oscila entre los 3°C y 17°C, su precipitación registra un promedio anual de 2.158 mm. Están representadas dos zonas de vida, Bosque Pluvial Montano y Bosque Muy Húmedo Montano. En esta área silvestre nacen varios ríos y quebradas que dan origen a las cuencas del Reventazón, Sarapiquí, Sucio y Toro Amarillo. La vegetación ha sufrido importantes alteraciones a lo largo de los años por las constantes erupciones volcánicas, en la actualidad se observa un crecimiento esparcido de plantas en los alrededores de los cráteres, mientras que en el resto del parque es posible encontrar bosque primario como secundario, aunque la mayoría del bosque se encuentra en el lado Caribe del volcán.

Alguna fauna registrada en esta área protegida incluye el conejo de monte, el coyote, el zorro, el armadillo, el puerco espín, la comadreja y la ardilla roja, además, aves como lechuzas, junco volcanero, carpintero caneto, el yigüirro, jilguero, entre otros.

Las principales razones que justifican la existencia de esta área protegida incluyen el que protege el volcán más alto de Costa Rica, resguarda uno de los pocos reductos de vegetación de páramo presentes en nuestro país, preserva los sitios de origen de varias cuencas hidrográficas, abriga varias zonas de vida del país y es una importante zona de protección de flora y fauna, que incluye al menos nueve especies de plantas endémicas de Costa Rica.

En la actualidad, el uso de herramientas informáticas para realizar predicciones espaciales explícitas de distribución es un medio importante que permite buscar relaciones entre grupos de variables ambientales y presencia de especies o grupos de especies (Guisan, et al. 2006; citado por Mijail et al. 2009). Los mapas que se obtienen muestran distribuciones potenciales más que reales (Guisan & Zimmermann, 2000; citado por Mijail et al. 2009), pero constituyen una técnica importante en biología analítica, con aplicaciones en conservación y planeamiento de reservas, ecología, evolución, epidemiología, manejo de especies invasoras, cambio climático y otros campos (Corsi et al. 1999; Peterson & Shaw 2003; Peterson et al. 2001; Scott et al., 2002; Welk et al. 2002; Yom-Tov & Kadmon 1998; citados por Mijail et al. 2009).

En Costa Rica no se ha realizado una monografía formal y extensa que evalúe de manera sistemática, objetiva y con el uso herramientas informáticas el efecto del cambio climático sobre el patrón de distribución de las especies de plantas. Actualmente es incierto si las especies de plantas en nuestro país, o al menos en algunos ecosistemas específicos, serán capaces de evolucionar y adaptarse a tiempo al cambio climático. Es por eso que, bajo los anteriores antecedentes, el Parque Nacional Volcán Irazú (PNVI) es un sistema montañoso que reúne características importantes para monitorear el efecto del cambio climático sobre el patrón de distribución de sus especies de plantas.

5 METODOLOGIA

5.1 Abordaje metodológico para los objetivos 1 y 2

1. *Realizar simulaciones que proyecten a mediano y largo plazo la variación en el patrón de distribución de 47 especies de plantas presentes en el PNVI por efecto del cambio climático, con el fin de valorar su riesgo de extinción local, capacidad de desplazamiento o adaptación a las nuevas condiciones climáticas.*

2. *Valorar la posibilidad de ingreso al PNVI, por efecto del cambio climático, de especies de plantas actualmente consideradas como arvense, evaluando 8 taxones distintos que en el presente no se encuentran pero tienen alto potencial de inserción en el sitio.*

5.1.1 Área de estudio

El área de estudio considera los límites geográficos del Parque Nacional Volcán Irazú (PNVI), el cual se localiza sobre la Cordillera Volcánica Central, en la provincia de Cartago, cantón de Oreamuno, y abarca parte de los distritos de Santa Rosa, Potrero Cerrado, Tierra Blanca y Llano Grande.

5.1.2 Especies a evaluar

En este estudio se evaluaron al menos 100 especies de plantas nativas de Costa Rica y presentes en el PNVI; además, 16 especies consideradas como arvense pero ausentes y con potencial de ingreso al PNVI.

Para definir la lista de las 100 especies presentes en el PNVI a incluir en el estudio, se realizó una lista preliminar de todas las especies de plantas actualmente allí registradas a partir de la información disponible en los principales herbarios nacionales, llámese Herbario Nacional de Costa Rica (CR), Instituto Nacional de Biodiversidad (INB) y Herbario de la Universidad de Costa Rica (USJ). Luego, se definieron los criterios prioritarios a utilizar para la selección de la lista final de especies a someter a evaluación. Entre los criterios utilizados están: Especies con distribución mundial restringida (llámese endémicas del parque o de Costa Rica), especies raras (no son endémicas, pero son conocidas en el país de pocas localidades), especies con importantes usos etnobotánicos (maderables, medicinales, alimento, otras), especies indicadoras de ecosistemas de alta relevancia en el parque (por ejemplo páramo). En este estudio clasificaron solamente 47 especies que fueron las que cumplieron con la información básica requerida para la simulación con MaxEnt y con la validez mínima aceptable para estudios similares.

Para las especies de arvenses se trabajó con una lista de 16, de las cuales 8 especies cumplieron la información básica requerida para la simulación, constituyendo los taxones

que pueden presentar alta probabilidad de ingresar al parque debido a su adaptabilidad ecológica.

5.1.3 Fuentes de información

La información a utilizar en este proyecto tuvo dos fuentes principales:

Colectas de campo: Durante la ejecución de este proyecto se realizaron varias giras de campo, a partir de las cuales se colectaron especímenes de los taxones de interés. A cada espécimen recolectado se le tomó la siguiente información: fecha de recolección, localidad (ubicación política, coordenadas geográficas y altitud), nombre y número de recolector, clasificación taxonómica (familia, género, especie), nombre del identificador y notas taxonómicas (hábito y descripción de flores y/o frutos). Además, se recopilaron imágenes fotográficas de las especies evaluadas. Las recolectas se hicieron mediante caminatas aleatorias, procurando registrar representatividad de la mayor cantidad de ecosistemas allí presentes.

Inventario nacional de flora: Para disponer de la información para el análisis respectivo, se incorporó toda la información disponible en las colecciones presentes en los diferentes herbarios del país, llámese del Instituto Nacional de Biodiversidad (INB), Museo Nacional de Costa Rica (CR), Universidad de Costa Rica (USJ); también, se incluyó la información presentada en la base de datos del Jardín Botánico de Missouri (MO). Al menos en los herbarios nacionales se verificó físicamente la identificación taxonómica de cada espécimen de interés. La clasificación, identificación y nomenclatura a aplicar utilizó como referencia lo establecido en algunas floras locales o regionales (Hammel et al., 2003a, 2003b, 2004, 2007; Davidse et al., 1994, 1995; Burger 1971-2000; Stevens et al., 2001a, 2001b, 2001c). En tanto, el sistema de clasificación de familias utilizó como base principal lo presentado por el APG II (2003).

5.1.4 Manejo de la información

Se construyó una base de datos robusta, en formato Excel, que incluyó para cada taxón, la lista de especímenes recolectados durante las giras de campo y la información de los especímenes previamente recolectados por el proyecto y depositados en los diferentes herbarios.

Entre la información que se incluyó en la base de datos, se detalla información de la identificación del espécimen, ubicación política y geográfica, elevación, recolector y número de recolección.

5.1.5 Área de distribución potencial de las especies

La distribución geográfica considerando la extensión de la presencia, se refiere al área de distribución potencial de una especie, la cual se determina de acuerdo con sus registros y observaciones de presencia en diferentes localidades. Este valor se expresa en kilómetros cuadrados (km²).

El área de distribución potencial de una especie se definió a partir de los ejemplares recolectados durante el proyecto y utilizando los datos de los especímenes depositados en los herbarios. También, se utilizaron otras referencias como las observaciones de campo (sin recolección del espécimen), información derivada de revisiones taxonómicas, por ejemplo, el Manual de plantas de Costa Rica (Hammel et al., 2003a, 2003b, 2004, 2007) y criterio de expertos.

Para modelar la distribución de las especies se tomaron en cuenta varios programas que han sido documentados y seleccionados por la comunidad científica: GARP, DIVA-GIS y MaxEnt. Todos estos programas son gratuitos y de libre distribución.

Después de analizar los diferentes programas de simulación se escogió el programa MaxEnt3.3.3k, ampliamente utilizado para el modelamiento a nivel de especie. Este software funciona con algoritmos que predicen el potencial de distribución de las especies con relación a condiciones ambientales conocidas y recopiladas en el tiempo (Phillips, Anderson y Schapire, 2006) y se considera como uno de los programas más eficientes en dichas predicciones (Elith et al., 2006). Se calibró con las siguientes especificaciones para todos los casos: con los puntos de ocurrencia de visitas de campo y herbarios, el 75% de las ocurrencias para el entrenamiento del modelo y el 25% restante para realizar su respectiva validación, según sugieren varios autores (Alba-Sánchez et al, 2010). Además, se configuró con un umbral de convergencia de 0,00001 y como límite superior de corrida un valor de 10000 interacciones según recomienda Phillips et al, (2006). Para la visualización y configuración de las capas y mapas generados, se utilizó ARCGIS 10.2 y QGIS 2.8.

La decisión de utilizar el MaxEnt se basó en al menos tres aspectos: es un software de uso libre ampliamente utilizado para los mismos propósitos, trabaja con pocas ocurrencias de especies (al menos 20) y trabaja con datos de presencia en comparación con otras aplicaciones que requieren más información.

5.1.6 Información climática

Para la información climática se utilizó como referencia dos fuentes importantes:

- Datos climáticos provistos por Instituto Meteorológico Nacional.

- Información del clima a nivel mundial, provistos por lo que se empleará Worldclim v1.4 (Hijmans, Cameron, Parra, Jones & Jarvis, 2005), el cual utiliza información del clima con datos observados y representativos para el período 1950-2000.

El formato de la información climática son cuadrículas (raster o grid), con sistema de coordenadas geográficas (grados, minutos y segundos), con Datum WGS84. Existen cuatro diferentes resoluciones espaciales de información: 30 segundos ($0.93 \times 0.93 = 0.86$ km² en el ecuador); 2.5, 5 y 10 minutos ($18.6 \times 18.6 = 344$ km² en el ecuador). Para el modelado de distribución de las especies se utilizó la máxima resolución (30 segundos), por lo tanto, el tamaño de cada cuadrícula es de 0.86 km².

Todas las capas fueron modificadas al tamaño de Costa Rica para su análisis con el programa MaxEnt. Se utilizaron los escenarios climáticos de trayectorias de concentración representativas (RCP) 4.5 (estabilización) con predicciones realizadas al 2050 (promedio entre los años 2041-2060) y el 2070 (promedio entre los años 2061-2080).

Para generar el modelo de distribución de cada especie con MaxEnt se utilizó la información de altitud y las 19 variables climáticas (Worldclim), estas últimas se derivan de los valores mensuales de la temperatura y de la precipitación para generar variables biológicamente más significativas.

Las variables bioclimáticas representan tendencias anuales (temperatura media anual, precipitación anual), estacionalidad (rango de temperatura anual y precipitación) factores limitantes ambientales (temperatura en el mes más frío y cálido, la precipitación más húmeda y seca en período de tres meses); las variables utilizadas son:

BIO1 = Temperatura Media Anual

BIO2 = Rango medio diurno (Media mensual (max temp - min temp))

BIO3 = Isothermality (P2/P7) (* 100)

BIO4 = Temperatura estacional (desviación estándar *100)

BIO5 = Máxima Temperatura en el mes más cálido

BIO6 = Mínima Temperatura en el mes más frío

BIO7 = Rango de Temperatura Anual (P5-P6)

BIO8 = Temperatura Media en los tres meses mas húmedo

BIO9 = Temperatura Media en los tres meses más secos

BIO10 = Temperatura Media en los tres meses más calientes

BIO11 = Temperatura Media en los tres meses más fríos

BIO12 = Precipitación Anual

BIO13 = Precipitación en el mes más húmedo

BIO14 = Precipitación en el mes más seco

BIO15 = Precipitación estacional (Coeficiente de variación)

BIO16 = Precipitación en los tres meses más húmedos

BIO17 = Precipitación en los tres meses más secos

BIO18 = Precipitación en los tres meses más calientes

BIO19 = Precipitación en los tres meses más fríos

A cada especie, tanto las presentes dentro del parque como las arvenses externas al mismo, se le generaron tres modelos de distribución potencial. El primero consideró las condiciones climáticas del presente. El segundo utilizó las condiciones climáticas presentadas dentro de 20 años (mediano plazo). Un tercer modelo empleó las condiciones climáticas proyectadas para dentro de 50 años (largo plazo).

5.1.7 Simulaciones de cambio climático

Amparado a los modelos de cambio climático para Costa Rica, predichos por PRECIS (Modelo de circulación global usado para generar escenarios de CC para Costa Rica – IMN, 2008), se obtuvieron los modelos de cambio climático necesarios para las zonas de estudio.

Finalmente a cada especie evaluada y que forma parte del presente estudio, se le realizó un análisis comparativo del área de hábitat disponible considerando el mapa de distribución potencial actual y los mapas de distribución de mediano y largo plazo. En tanto, las especies de arvenses que en la actualidad no se registran dentro del área protegida se analizaron si a mediano o largo plazo alcanzarán ingresar a dicha zona protegida.

El programa MaxEnt genera gran cantidad de información para cada especie analizada, por lo que se generó carpetas individuales para cada especie con la siguiente información: Ubicación de las ocurrencias de la especie en formato shape para visualizarlas en GIS, Resultados de MaxEnt, mapa de la distribución actual, 2050 y 2070.

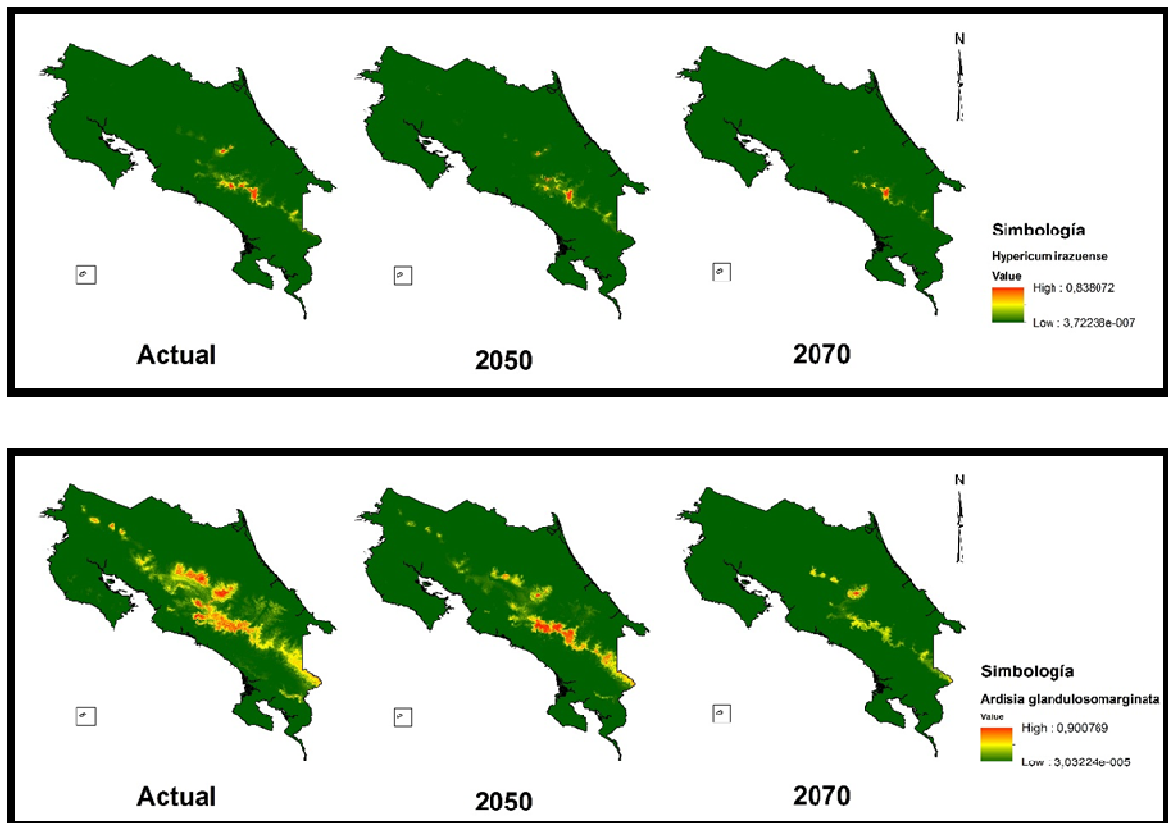


Figura 1. Ejemplos de modelos generados pro MaxEnt.

Para realizar las corridas en MaxEnt es necesario modificar las bases de datos con las siguientes especificaciones: las capas deben tener todo el mismo tamaño, en formato ASCII acomodadas en una sola carpeta y los nombres no deben llevar espacios en blanco. La base de datos con la información de las especies georreferenciadas debe estar en formato .CSV, nombres sin espacios en blanco, los puntos en Datum WGS84 con grados y decimales, ubicando primero el nombre de la especie, longitud y luego latitud, además, no debe llevar comas en la separación de números, el único admitido es el punto (.).

5.1.8 Criterios iniciales de escogencia para establecer parcelas permanentes (PPM)

Con ayuda del Atlas Digital 2014 de Costa Rica, se generó diferentes capas shapes con información relevante dentro del Parque Nacional Volcán Irazú (PNVI). Los principales criterios para evaluar la factibilidad de ubicación de las parcelas fueron: Zonas de vida, Cantones, Elevación, Cobertura, sub-cuenca, calles.

Un ejemplo es el siguiente mapa, donde se establecieron franjas altitudinales cada 200 metros dentro del Parque, comenzando en los 2300 metros, hasta 3400 metros. En cada franja se generó una grilla de puntos con distancia de 100 metros entre puntos para realizar una selección al azar junto con otras variables a considerar.

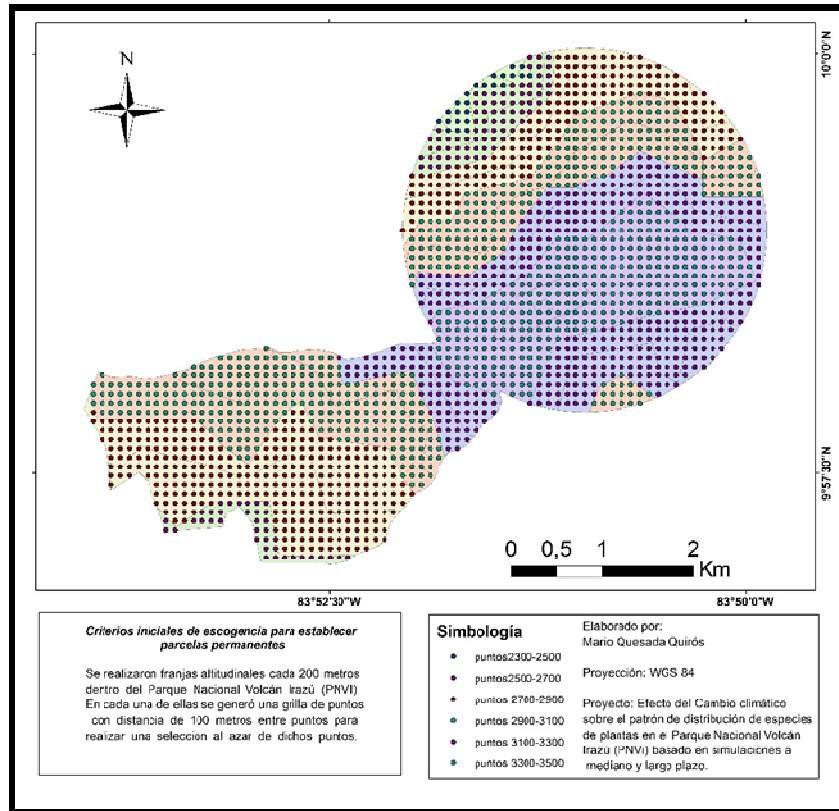


Figura 2. Mapa de puntos potenciales de muestreo por piso altitudinal.

De igual forma se realizó mapas con un buffer de 5 kilómetros del borde del Parque para generar información de puntos de colecta, para realizar colectas de especies invasoras con alto grado de colonización en el ecosistema dentro del PNVI. Además, esta información ayudó a formar criterios de selección para incluirlas en el libro.

Por la dificultad del terreno, las altas pendientes, zonas inseguras por deslizamientos y sectores que siguen en condición de tierras privadas dentro de PNVI, se realizó la ubicación final de 10 parcelas permanentes: 3 en el sector Cráteres y 6 en el sector Prusia (de las cuales 3 están en bosque secundario y remanente y tres en plantaciones de eucalipto y pino)

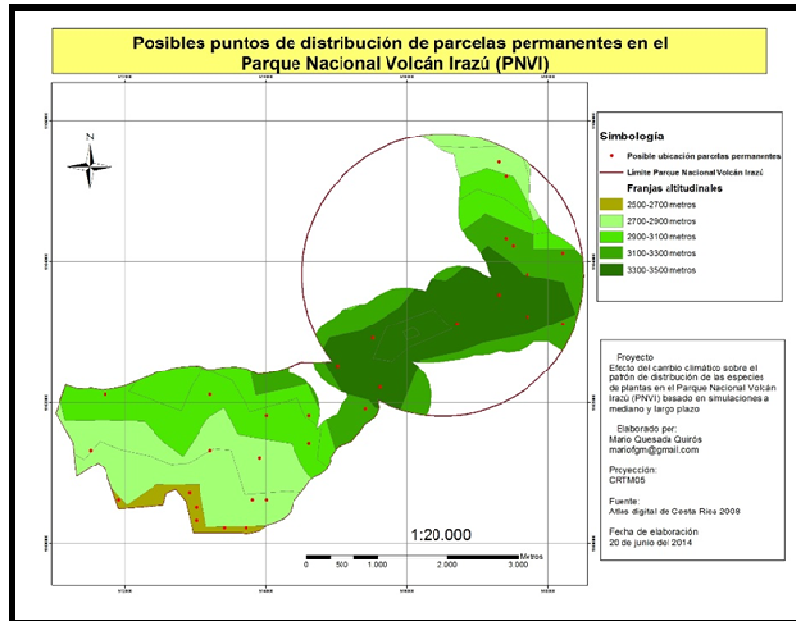


Figura 3. Puntos potenciales para la ubicación de las parcelas permanentes de muestreo.

5.2 Abordaje metodológico para el objetivo 3

Definir acciones a seguir en procura de mitigar el efecto del cambio climático en el patrón de distribución de las especies de plantas presentes en el PNVI.

A nivel de paisaje florístico se definieron los sectores del parque más frágiles y susceptibles a sufrir cambios, tanto a mediano como a largo plazo, lo cual se logró visualizar a partir de la trasposición de todos los mapas distribución de las especies.

A nivel de especies, se determinó a mediano y largo plazo cuales tienen posibilidad absoluta o alto riesgo de ser extintas del área de estudio, o las que sufrirán cambios importantes en su área distribución; además, entre las arvenses evaluadas se determinó cuales presentan alta probabilidad de ingresar al parque, evaluando los cambios en el patrón de distribución a mediano y largo plazo.

Finalmente, con los resultados antes logrados se realizaron las recomendaciones a nivel político y de campo que estén orientadas a mitigar el efecto del cambio climático sobre el patrón de distribución de las especies dentro del área de estudio, recomendaciones que serán compartidas, discutidas y mejoradas en un taller técnico de divulgación.

5.3 Abordaje metodológico objetivo 4

Divulgar los resultados obtenidos en instituciones del Estado, tomadores de decisiones y en el público general mediante publicaciones científicas, talleres y congresos.

Toda la información recolectada a nivel de visitas de campo, revisión en herbarios, y la construcción de las bases de datos, fueron diseñadas de tal forma que posterior al análisis y las simulaciones, se pudiera concentrar todos estos resultados en un producto que estuviera disponible a la comunidad científica y generar una herramienta de suma utilidad para el personal técnico del PNVI y al público en general y dar conocer acerca de las especies de plantas del sitio, así como el efecto del cambio climático y de las posibles recomendaciones a seguir con el fin de mitigar el impacto sobre las mismas. Se trabajó desde le inició del proyecto en la elaboración de un libro, que formalmente fue presentado a la Editorial Tecnológica de Costa Rica y que está en la fase de evaluación. Se redactaron al menos dos artículos científicos para ser enviados a una revista científica (una ISI y otra indexada en SCIELO).

El proyecto ejecutó varias actividades de discusión y divulgación de los resultados obtenidos. Otras actividades quedan aún pendientes de desarrollar en el 2016, por motivo de calendarización del personal del SINAC y naturalmente se continuará con la divulgación de resultados en congreso y seminarios en el 2016

6 Resultados

En esta sección se presentan los resultados del proyecto, los cuales están ordenados en los artículos científicos y el libro, todos productos de la investigación que se han preparado.

6.1 Capítulo 1

Este Capítulo presenta los resultados en formato de artículos científicos, donde se compila y analiza información, logrando cubrir los objetivos específicos 1, 2 y 3.

6.1.1 Artículo 1. Bosques en el gradiente altitudinal del PNVI, sometido a la Revista Bosque

Descripción de dos comunidades boscosas en el gradiente altitudinal del Parque Nacional Volcán Irazú, Costa Rica.

Luis Guillermo Acosta-Vargas^{a*}, Dagoberto Arias-Aguilar^a, Mario Quesada-Quirós^a,
Alexander Rodríguez González^b

^aInstituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Cartago, Costa Rica.

*Autor de correspondencia: ^bEscuela de Ingeniería Forestal, Cartago, Costa Rica, tel.: 506-25502279, lacosta@itcr.ac.cr

^cMuseo Nacional de Costa Rica, Herbario Nacional, San José, Costa Rica.

Resumen

El Parque Nacional Volcán Irazú (PNVI), es uno de los picos más altos de Costa Rica; constituye una isla altitudinal y es uno de los pocos sitios con asociación vegetal conocida como páramo. El objetivo de la investigación fue describir la estructura y composición del bosque montano y subpáramo del PNVI. Se establecieron tres parcelas 1000 m² por tipo de bosque, se midió diámetro y altura a todos los árboles con $d \geq 5$ cm. El análisis de cluster demostró que ambas comunidades son diferentes; para la muestra el bosque montano reportó 20 especies, mientras el subpáramo seis especies; *Comarostaphylis arbutoides* es la especie de mayor importancia para ambas comunidades. La diversidad alfa para el bosque montano y el subpáramo fueron respectivamente para el índice de Shannon 2,09 y 1,02 y, de 0,19 y 0,49 para el índice de dominancia. En ambos bosques las distribuciones diamétricas se ajustan al modelo de J invertida, el subpáramo reportó diámetros menores que el montano; el área basal para el bosque montano fue de 31,68 m²ha⁻¹ y para el subpáramo de 4,67 m²ha⁻¹. Respecto al dosel, el bosque montano alcanzó los 21 m de altura y definió tres estratos; el subpáramo alcanzó los 8 m y no diferenció estratos. El

PNVI, por su condición de isla altitudinal, representa un sitio de alto valor para la conservación y la investigación de la comunidad vegetal del subpáramo.

Palabras clave: Volcán Irazú, Cordillera Central, gradiente altitudinal, páramo, subpáramo, montano, bosque, *Comarostaphylis arbutoides*.

Summary

Irazú Volcano National Park (IVNP) with an altitude of 3432 m.a.s.l, is one of the highest peaks of Costa Rica; it is considered an altitudinal island and, it is one of few sites with moorland plant association. The aim of this study was to describe the structure and composition of montane and low lying paramo forest types at IVNP. Three plots of 1000 m² were established in each type of forest in which all trees with $d \geq 5$ cm were identified and measured. With the gathered information, diversity, structure and composition analysis of forests were made. Cluster analysis showed that the two communities are different; montane forest has more species (20), whilst the subparamo has six species; *Comarostaphylis arbutoides* is the most important species for both communities. Alpha diversity for montane forest and subparamo were 2.09 and 1.02 respectively for Shannon index and 0.19 and 0.49 respectively for the dominance index. In both forests the diameter distributions fit the inverted J model and differ from each other, being the subparamo the one that reaches lower diameters than the montane forest; basal area for the montane forest is 31.68 m²ha⁻¹ and 4,67m²ha⁻¹ for the subparamo. The canopy of the montane forest reaches 21 m in height with three defined cohorts, while the subparamo canopy reaches 8 m with no difference in strata. The IVNP due to its altitudinal island condition represents a high value site for conservation and plant community research of the subparamo.

Keywords: Irazu Volcano, Central Cordillera, altitudinal gradient, moor, subpáramo, montane forest, *Comarostaphylis arbutoides*.

Resumen

El Parque Nacional Volcán Irazú (PNVI), es uno de los picos más altos de Costa Rica; constituye una isla altitudinal y es uno de los pocos sitios con asociación vegetal conocida como páramo. El objetivo de la investigación fue describir la estructura y composición del bosque montano y subpáramo del PNVI. Se establecieron tres parcelas 1000 m² por tipo de bosque, se midió diámetro y altura a todos los árboles con $d \geq 5$ cm. El análisis de cluster demostró que ambas comunidades son diferentes; para la muestra el bosque montano reportó 20 especies, mientras el subpáramo seis especies; *Comarostaphylis arbutoides* es la especie de mayor importancia para ambas comunidades. La diversidad alfa para el bosque montano y el subpáramo fueron respectivamente para el índice de Shannon 2,09 y 1,02 y,

de 0,19 y 0,49 para el índice de dominancia. En ambos bosques las distribuciones diamétricas se ajustan al modelo de J invertida, el subpáramo reportó diámetros menores que el montano; el área basal para el bosque montano fue de 31,68 m²ha⁻¹ y para el subpáramo de 4,67m²ha⁻¹. Respecto al dosel, el bosque montano alcanzó los 21 m de altura y definió tres estratos; el subpáramo alcanzó los 8 m y no diferenció estratos. El PNVI, por su condición de isla altitudinal, representa un sitio de alto valor para la conservación y la investigación de la comunidad vegetal del subpáramo.

Palabras clave: Volcán Irazú, Cordillera Central, gradiente altitudinal, páramo, subpáramo, montano, bosque, *Comarostaphylis arbutoides*.

INTRODUCCIÓN

Los estudios realizados en bosques montanos han demostrado que su composición florística es menor al compararla con bosques tropicales de tierras bajas (Cascante & Estrada 2000). Además se destaca que no existe información detallada sobre la riqueza de especies, familias y formas de vida (Lieberman et al. 1996).

El estudio de gradientes altitudinales ha permitido conocer dichas variaciones en la diversidad de especies conforme se asciende a través de los pisos altitudinales, determinándose que la misma disminuye considerablemente sobre los 2500 msnm (Grytnes y Vetaas 2002; Wang et al. 2003). Este patrón altitudinal en la riqueza de especies se asemeja el patrón latitudinal de la riqueza de especies (Rahbek 1997; Brown y Lomolino 1998; Givnish 1999).

Los bosques montanos y en especial los bosques nubosos y de páramo, enfrentan serias amenazas ante el cambio climático y en particular en la formación de nubes, ya que cambios en el patrón de nubosidad implicaría una seria amenaza de reemplazando del ecosistema de bosque nuboso. Algunas de las alteraciones previstas ante escenarios de cambio climático son pérdida de diversidad, cambios en el patrón de distribución de especies y la muerte del bosque (Foster 2001).

Por otra parte se encuentran los páramos, ecosistemas de importancia por su endemismo y provisión de agua. En Costa Rica, éstos ocupan 152 km², lo que representa el 0.4% del área de páramos tropicales y alrededor del 90% del páramo centroamericano. En Costa Rica los páramos se concentran principalmente en la Cordillera de Talamanca. En el caso del PNVI, se encuentra la zona más baja de páramos, la cual es conocida como subpáramo (Kappelle y Horn 2005).

De acuerdo con Kappelle y Horn (2005) la asociación vegetal conocida como páramos integra tres unidades definidas por la altitud y su estructura: el subpáramo, es una zona de

transición constituida por arbustos y la más diversa de las tres zonas de páramo y se ubica entre los (2800)3000-3500 msnm; el páramo de gramíneas, ubicado entre los 3500-4100(4400) msnm, está compuesta principalmente por pastizales de gramíneas en macollas de especies de los géneros *Calamagrostis* y/o *Festuca*. Finalmente, el superpáramo, ubicado por debajo de la línea de nieve perpetua entre (4000) 4500-4800 (5000) msnm, constituye una zona angosta de vegetación que crece sobre material rocoso y suelos de material grueso y arenoso.

En vista de la importancia de los bosques montanos y de páramo, por su composición de especies así como en el monitoreo del cambio climático, el objetivo del presente estudio fue describir la estructura del bosque y la composición florísticas de los bosques del Parque Nacional Volcán Irazú.

MATERIALES Y METODOS

Descripción del sitio: El Parque Nacional Volcán Irazú (PNVI), es un volcán activo y el de mayor altitud en Costa Rica, con 3432 msnm. Fue declarado parque nacional en 1955 y en 1998 se anexaron los terrenos que hoy día componen el sector Prusia; su extensión total es de 2000,36 ha constituida principalmente por plantaciones forestales, bosques primarios y secundarios (ACCVC y ONCA 2008).

El parque se ubica en la Cordillera Volcánica Central, provincia de Cartago, entre los 9° 57" N y 9° 58" N y 083° 50" W y 083° 52" W. La temperatura oscila entre los 3 °C y 17 °C, y la precipitación media anual es de 2158 mm. Están representadas dos zonas de vida, Bosque Pluvial Montano y Bosque Muy Húmedo Montano, en las que se albergan bosques montanos y de páramo. En esta área silvestre nacen varios ríos y quebradas que dan origen a las cuencas del Reventazón, Sarapiquí, Sucio y Toro Amarillo. La vegetación ha sufrido importantes alteraciones a lo largo de los años por las constantes erupciones volcánicas, en la actualidad se observa un crecimiento esparcido de plantas en los alrededores de los cráteres, mientras que en el resto del parque es posible encontrar bosque primario como secundario, aunque la mayoría del bosque se encuentra en el Sector Norte que es colindante con el Parque Nacional Braulio Carrillo (ACCVC y ONCA 2008).

Algunas razones importantes que justifican la existencia de esta área protegida incluyen el que protege el volcán más alto de Costa Rica, resguarda uno de los pocos reductos de vegetación de páramo presentes en Costa Rica, preserva los sitios de origen de varias cuencas hidrográficas, abriga al menos dos zonas de vida y es una importante zona de protección de flora y fauna, que incluye al menos nueve especies de plantas endémicas de Costa Rica (ACCVC y ONCA 2008).

Selección de sitios: Por medio del programa Quantum GIS V2.0 (QGIS Development Team 2016), se generó un buffer de 200 m sobre la capa de caminos del PNVI, con el mismo software se generaron seis puntos de muestreo aleatorios por banda altitudinal cada 200 m entre los 2500 msnm y los 3500 msnm definiéndose el bosque montano entre los 2300-2900 msnm y el subpáramo entre los 3100-3500 msnm. La banda entre los 2900-3100 msnm no se incluyó por su difícil acceso y fuertes pendientes, mismos criterios aplicados para excluir del muestreo el Sector Norte y Noroeste. Las restricciones de selección fueron muestrear en la vertiente pacífica, accesibilidad a los puntos de muestreo y pendientes menores al 50 %. (figura 1).

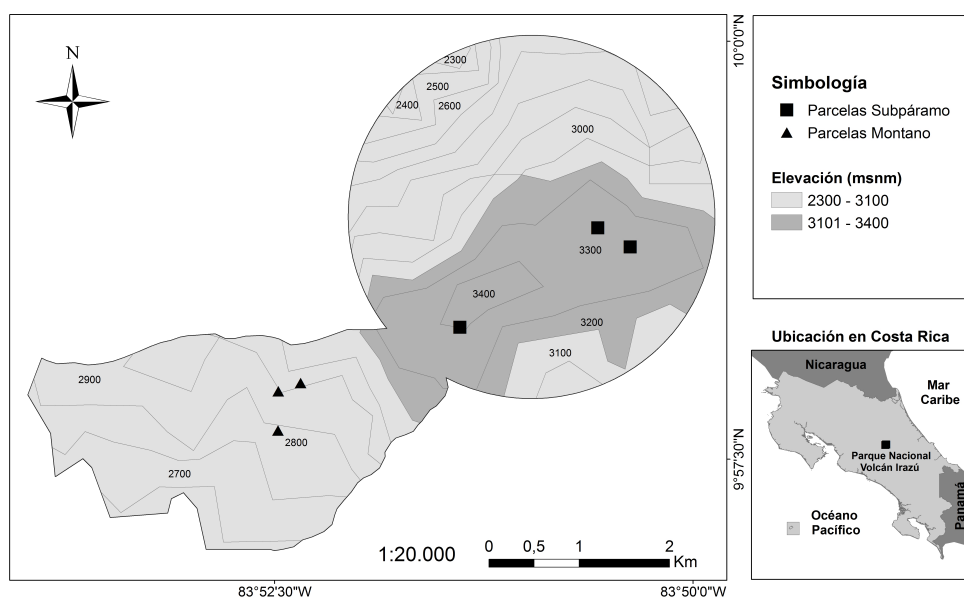


Figura 1. Distribución de parcelas permanentes establecidas en el Parque Nacional Volcán Irazú.

Establecimiento de parcelas: en los sitios seleccionados se establecieron tres parcelas permanentes de muestreo (PPM) de 50 × 20 m, subdivididas en cuadrículas de 10 × 10 m por cada piso altitudinal para un total de 6 PPM. Las PPM fueron establecidas en el campo siguiendo rumbos francos. El tamaño de las parcelas fue seleccionado según los siguientes criterios: la abrupta topografía en la mayoría de sitios del PNVI y la presencia asociaciones vegetales de especies arbustivas o achaparradas donde la mayoría de los árboles no alcanzan grandes diámetros.

VARIABLES A MEDIR: árboles con diámetro ≥ 5 cm a 1.3 m del suelo fueron identificados y se les midió el diámetro (d) y la altura total (h).

DIVERSIDAD: para diversidad alfa se utilizaron:

- Índice de diversidad de Shannon (H1) que es un 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 (Hmax). Hammer (2011), indica que este índice toma en cuenta el número de individuos y especies. Y su valor va de 0 hasta valores altos para comunidades con muchas especies y cada especie con pocos individuos.
- Dominancia que equivale a 1-Simpson, tomando valores entre 0 y 1; valores de cero indican que todas las especies están representadas equitativamente, valores de 1 indican dominancia de una especie.
- Índice de Simpson 1-D: mide la igualdad de la comunidad y toma valores entre 0 a 1.
- Para diversidad beta, se utilizó el Índice de Jaccard (IJ) utilizado para comparar comunidades por medio de ausencia y presencia de especies; toma valores entre 0 cuando no hay especies compartidas entre sitios y de 1 para cuando los sitios tienen la misma composición de especies (Moreno 2001). Este índice se utilizó en PAST para generar los análisis de Cluster.
- Índice de Morisita-Horn (IM), Mostacedo y Fredericksen (2000), indican que este índice es el más satisfactorio. Es un índice influenciado por la riqueza de especies y al tamaño de la muestra. Su desventaja está, en que es sensible a la abundancia de la especie más abundante (Magurran, 1988; Baev y Penev citados por Moreno, 2001).

Estructura vertical del bosque: fue analizada por medio de las clases de altura según (Lamprecht 1990), donde el estrato alto corresponde a $> 2/3$ de la altura total, estrato medio entre $1/3$ y $2/3$ de la altura total y el estrato bajo $< 1/3$ de la altura total.

Estructura horizontal del bosque: se analizó por medio de la distribución diamétrica de la abundancia en intervalos de $d > 5$ cm; el índice de valor de importancia (IVI) compuesto por la abundancia, frecuencia y dominancia definidas por Lamprecht (1990) como:

Abundancia (N): corresponde al número de individuos reportados, totales o por especie.

Dominancia: corresponde a la suma de las áreas basales (G) la cual fue calculada por la ecuación $G = \sum 0.7854 d^2$, donde d es el diámetro medido a 1.3 m del suelo conocido como diámetro a la altura del pecho (dap).

Frecuencia, definida como la presencia o ausencia de una especie dentro de las unidades de muestreo, se definen cinco clases de frecuencia según el porcentaje de registros que tenga una especie en las unidades de muestreo: I: 1-20 %, II: 21-40 %, III: 41-60 %, IV: 61-80 %, V: 81-100 %.

Procesamiento de datos: se realizó utilizando el software estadístico PAST para los índices de diversidad, análisis de correspondencia y de clúster. Para los índices de diversidad PAST entrega intervalos de confianza aproximados con un 95% de confianza y son calculados por el procedimiento de bootstrap, para lo cual produce una muestra aleatoria de 9999 observaciones, cada una con igual número de individuos a la original (Hammer, 2011).

RESULTADOS

Composición florística del bosque: En el área muestreada en el bosque montano se reportaron 20 especies distribuidas en 16 familias y, para el subpáramo se reportaron seis especies pertenecientes a cinco familias. De las familias reportadas, Apiaceae e Hypericaceae solo están reportadas en el subpáramo, las demás familias están presentes en ambos sitios (cuadro 1). Para el bosque montano la familia Ericaceae reportó tres especies, Araliaceae y Primulaceae dos especies, las 13 familias restantes solo reportan una especie; para el subpáramo solo la familia Ericaceae reporta dos especies, las restantes una.

Cuadro 1. Especies reportadas por el muestreo y su área basal (G), frecuencia (Fr), abundancia (N) e índice de valor de importancia (IVI) para el bosque montano y subpáramo en el Parque Nacional Volcán Irazú, Costa Rica, 2016.

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	11,6
Araliaceae	<i>Oreopanax sp</i>	1	0,01	1	3,7
	<i>Oreopanax xalapensis</i> (Kunth) Decne. & Planch.	31	0,42	14	61,5
Asteraceae	<i>Senecio oerstedianus</i> Benth.	2	0,02	2	7,5
Berberidaceae	<i>Berberis hemsleyi</i> Donn. Sm.	3	0,01	2	7,9
Coriariaceae	<i>Coriaria microphylla</i> Poir.	2	0,01	2	7,4
Ericaceae	<i>Comarostaphylis arbutoides</i> Lindl.	94	7,54	23	171,0
	<i>Vaccinium consanguineum</i> Klotzsch	11	0,07	5	21,3
	<i>Vaccinium sp</i>	2	0,05	1	4,5
Fagaceae	<i>Quercus costaricensis</i> Liebm.	54	3,51	25	131,1
Melastomataceae	<i>Miconia schnellii</i> Wurdack	1	0,02	1	3,9
Myricaceae	<i>Morella cerifera</i> (L.) Small	4	0,03	3	11,7
Pinaceae	<i>Pinus radiata</i> D. Don	1	0,01	1	3,8
Polygalaceae	<i>Monnina pittieri</i> Chodat	1	0,00	1	3,7
Polygonaceae	<i>Muehlenbeckia tamnifolia</i> (Kunth) Meisn.	1	0,00	1	3,7
Primulaceae	<i>Ardisia glandulosomarginata</i> Oerst.	5	0,02	4	15,3
	<i>Myrsine dependens</i> (Ruiz & Pav.) Spreng.	19	0,21	10	42,0
Rosaceae	<i>Holodiscus argenteus</i> (L. f.) Maxim.	13	0,23	5	23,3
Scrophulariaceae	<i>Buddleja nitida</i> Benth.	18	0,50	11	47,3
Solanaceae	<i>Cestrum irazuense</i> Kuntze	3	0,01	2	7,8
Subpáramo		160	1,43	30,00	
Apiaceae	<i>Myrrhidendron donnellsmithii</i> J.M. Coult. & Rose	1	0,00	1	4,1
Ericaceae	<i>Comarostaphylis arbutoides</i> Lindl.	108	1,20	18	211,8
	<i>Vaccinium consanguineum</i> Klotzsch	17	0,07	7	38,8
Hypericaceae	<i>Hypericum irazuense</i> Kuntze ex N. Robson	3	0,01	2	9,1
Primulaceae	<i>Myrsine dependens</i> (Ruiz & Pav.) Spreng.	25	0,12	9	54,1
Rosaceae	<i>Holodiscus argenteus</i> (L. f.) Maxim.	6	0,02	4	18,8

Dentro de la composición florística, se resalta la importancia de *C. arbutoides* en ambas comunidades y su amplia distribución dentro del gradiente altitudinal (2500-3400 msnm).

En lo referente a formas de vida, árboles y arbustos se reportaron con mayor abundancia para ambos sitios; solo *M. tamnifolia* como una liana, registrada en el bosque montano y con baja abundancia (figura 2).

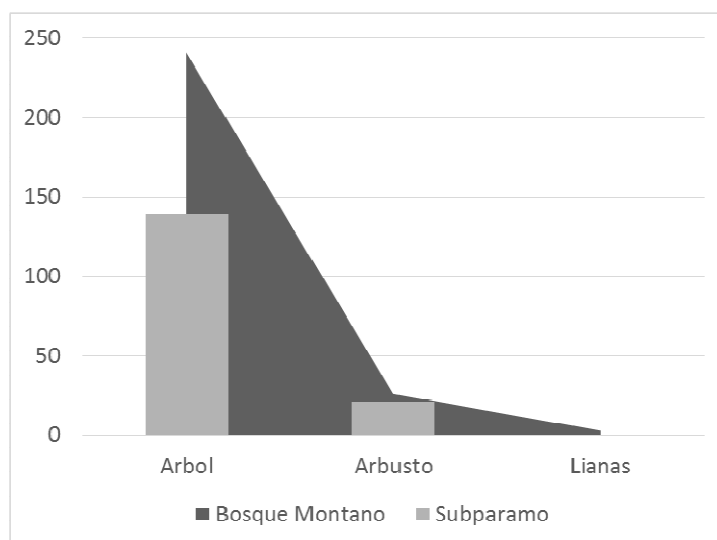


Figura 2. Abundancia por formas de vida en dos tipos de bosque del Parque Nacional Volcán Irazú, Costa Rica, 2016.

Diversidad en sitios: La diversidad alfa estimada para ambos sitios por medio de los Índices de Shannon, Dominancia y Simpson, indican una diferencia entre ambos sugiriendo mayor diversidad para el bosque montano (cuadro 2)

Cuadro 2. Índices de diversidad alfa para el bosque montano y subpáramo del Parque Nacional Volcán Irazú, Costa Rica, 2016.

Diversidad Alfa	Subparamo	Límite inferior	Límite superior	Montano	Límite inferior	Límite superior
Número especies	6	-	-	20	-	-
Individuos	160	-	-	270	-	-
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	1,02	0,87	1,16	2,09	1,98	2,23

De acuerdo el Índice de Jaccard para diversidad beta, los dos bosques comparten una similitud del 18.2 %, mientras el Índice de Morisita-Horn la similitud es de 0,001 %. Ambos índices coinciden en la diferenciación de ambos bosques.

Los análisis clúster y de correspondencia realizados son consistentes en las agrupaciones que realizan y las asociaciones vegetales observadas en el campo, agrupando los sitios de muestreo en bosque montano y subpáramo. La variación dada intragrupos observada en las agrupaciones es producto de la variación de cada sitio y al azar. (figura 3)

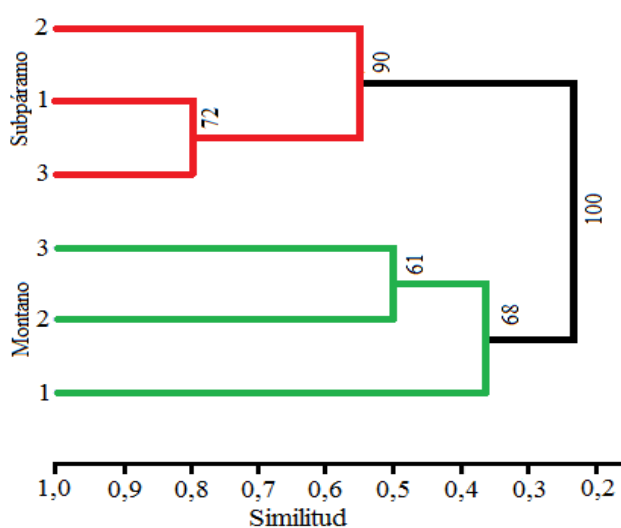


Figura 3. Análisis clúster utilizando en el Índice de Jaccard para dos pisos altitudinales en el Parque Nacional Volcán Irazú, Costa Rica, 2016.

Estructura del bosque: El área basal reportada para el bosque montano es de 31,68 m²ha⁻¹ (SD = 21,8; n = 3) y para el subpáramo de 4,76 m²ha⁻¹ (SD = 3,23; n= 3), que muestran una clara diferencia y una alta variabilidad dentro de cada tipo de bosque.

La distribución diamétrica para ambos bosques se ajusta al modelo de J invertida propia de bosques tropicales disetáneos. En el caso del subpáramo, no alcanza los diámetros del bosque premontano > 75 cm, quedándose en diámetros máximos de 30 cm (Fig. 4). Esta situación afecta la densidad de tallos d > 5 cm, así para el bosque montano la densidad de tallos con d = 5-10 cm es de 296,7 tallos ha⁻¹ (SD = 109,7; n = 3) y para d ≥ 10 cm la densidad es de 603,3 tallos ha⁻¹ (SD = 105,9; n = 3), mientras que para el subpáramo la densidad para d = 5-10 cm es de 363,3 tallos ha⁻¹ (SD = 231,15; n = 3) y para d ≥ 10 cm la densidad es de 170 tallos ha⁻¹ (SD = 124,9; n = 3).

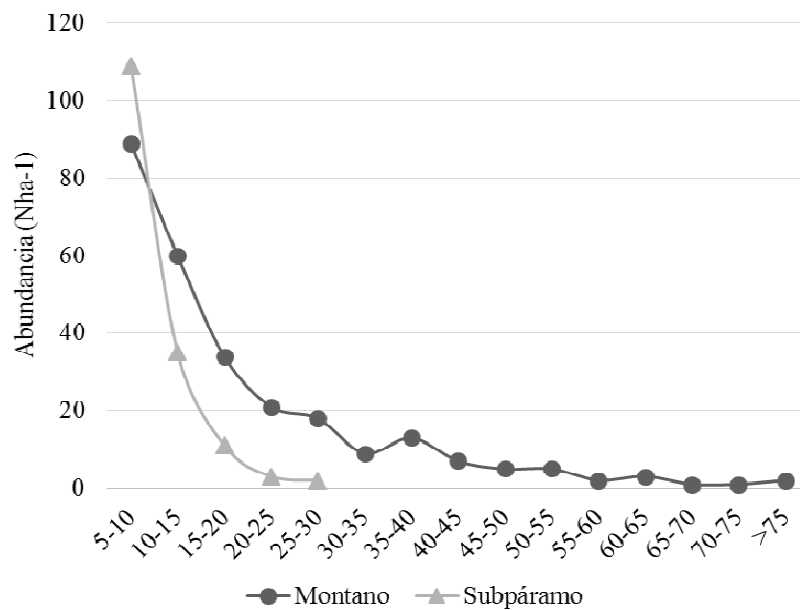


Fig. 4. Distribución diamétrica para dos tipos de bosque en el Parque Nacional Volcán Irazú, Costa Rica, 2017.

La estructura vertical del bosque montano mostró la definición de tres estratos, el estrato bajo de 1 a 8 m, el estrato medio de 8 a 15 m y estrato alto de 15 a 21 m. En el estrato medio se concentra la mayor abundancia. Para el subpáramo, la altura máxima de los árboles alcanza los 8 m y no se definen estratos por su baja altura, este es equivalente al estrato bajo del bosque montano (Fig. 5)

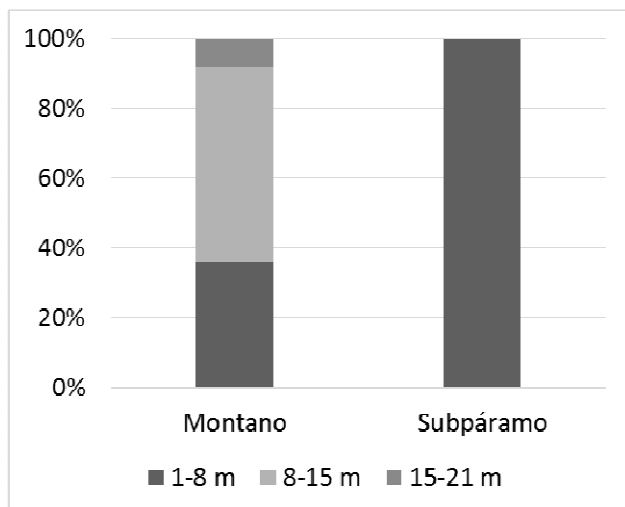


Fig. 5. Estratos de altura en el bosque montano y subpáramo del Parque Nacional Volcán Irazú, Costa Rica, 2016.

DISCUSIÓN

Los sitios estudiados en el PNVI, correspondientes a bosque montano y subpáramo, presentan un número de especies bajo comparado con bosques de altitudes inferiores en Costa Rica (Acosta-Vargas 1998). Dicha reducción del número de especies conforme se asciende en el gradiente altitudinal es concordante con el reportado en estudios de flora realizados dentro y fuera de Costa Rica (Lamprecht 1990, Lieberman et al. 1996; Kappelle et al. 1995).

La disminución del número especies de plantas entre el bosque montano (2500-3000 msnm) y el subpáramo (3000-3300 msnm), fue del 70% correspondiendo a 14 especies, y en ambos sitios las especies dominante es *C. arbutoides*. Dicho comportamiento fue observado por Lieberman et al. (1996) en el transecto La Selva-Volcán Barva, para un gradiente más amplio, pasando de 149 especies a los 300 msnm a tan solo 29 especies a 2600 msnm, con lo cual se reafirma la pérdida de diversidad conforme se asciende altitudinalmente y, donde la especie dominante reportada pertenece al género *Viburnum sp* (22,3 %).

La diferencia entre ambos sitios en cuanto a la reducción de diversidad (cuadro 2) así como en los cambios en la estructura del bosque es notoria. Estas diferencias entre los sitios, es clara en los resultados de los análisis de cluster y de correspondencia (Figura 3), donde las PPM son agrupadas de manera concordante a los dos tipos de bosque en los dos pisos altitudinales estudiados. Las diferencias que se presentan dentro de cada bosque corresponden a variaciones propias de cada sitio de muestreo, condiciones de micrositio y a la afectación de la erupción del Volcán Irazú en 1965, la cual produjo afectos negativos sobre el desarrollo de estos bosques incluso regresando algunos sectores a la sucesión primaria.

Comarostaphylis arbutoides, es la especie de mayor importancia en ambos bosques reflejado en el valor del IVI (bosque montano = 171; subpáramo = 211,8). La dominancia del *C. arbutoides* está claramente demostrada por el índice de dominancia (cuadro 2), principalmente en el subpáramo; para el bosque montano el mayor número de especies compensa el peso de *C. arbutoides*. Esta especie define la estructura y composición de estos bosques y en especial el subpáramo. Kappelle y Horn (2004) definen en los subpáramos de la Cordillera de Talamanca diferentes asociaciones, donde *C. arbutoides* es la especie que las define. De acuerdo al criterio de Kappelle y Horn (2004) extrapolado al PNVI, estos bosques corresponden al ecosistema “matorral tropical denso siempreverde latifoliado subalpino bien drenado dominado por *C. arbutoides*”.

En lo referente a formas de vida, 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 0,63,% de la abundancia del bosque montano. En el sector Prusia del PNVI se ubica el bosque montano, este sector fue afectado por la erupción de 1965, lo que dio paso al establecimiento de plantaciones forestales. Dentro de las especies utilizadas está *Pinus radiata*, esta especie fue registrada en una de las PPM. Aunque la abundancia es baja (0,03 %), esta puede convertirse en invasora dentro de este bosque; actualmente *P. radiata* se encuentra en fase de retardo enfrentando barreras como ausencia de micorrizas asociadas y ausencia de fuego; motivos por los que no se ha propagado en el sitio.

La estructura horizontal de ambos bosques, se ajustan al modelo de J invertida típico de bosques tropicales disetáneos. Sin embargo, el subpáramo no alcanza los mismos diámetros que el bosque montano quedando por debajo de este. Esta condición de subpáramo es concordante con los cambios de estructura reportados. El hecho que ambos bosques se ajusten al modelo de J invertida confirma la existencia de una distribución y una estructura poblacional que asegure el reemplazo por mortalidad natural.

La altura del dosel es similar a la reportada por Kappelle et al. (1995) y Lieberman et al. (1996) la cual alcanza los 26 m en el bosque montano, mientras que para el subpáramo la altura es mucho inferior, no superando los 8 m. Esto ha dado paso que en estos sectores de bosque se forme un matorral denso dominado por especies de la familia Ericaceae. Esta disminución de altura de los árboles al ascender altitudinalmente fue reportada por Whitmore (1989).

De acuerdo a la teoría de Islas, el PNVI constituye una isla altitudinal cuya fragilidad está acentuada por la fragmentación del bosque, en especial en el Sector Sur, en las faldas del volcán, donde la mayoría de las tierras aledañas al parque son hoy campos de cultivo. Para el subpáramo, esta situación se agrava por su pequeña extensión, aislamiento y distanciamiento con las otras áreas de subpáramo en Costa Rica como lo son el Cerro de la Muerte y Cordillera de Talamanca. Por tales motivos, el estudio de este ecosistema y su conservación son prioritarias.

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, a Elemer Briceño por la traducción y a los revisores anónimos que dieron sus aportes en las etapas tempranas de este artículo

BIBLIOGRAFIA

ACCVC & Onca Natural. (2008). Plan Maestro del Parque Nacional Irazú. Costa Rica. 103 p

Acosta-Vargas, L. G. (1998). *Análisis de la composición florística y estructura para la vegetación del piso basal de la zona protectora La Cangreja, Mastatal de Puriscal* (No. Thesis A185a). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago (Costa Rica). Escuela de Ingeniería Forestal.

Brown, J. H., and M. V. Lomolino. 1998. Biogeography. 2d ed. Sinauer, Sunderland, Mass.

Cascante, M. & 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.

Foster, P. (2001). The potential negative impacts of global climate change on tropical montane cloud forests. *Earth-Science Reviews*, 55(1), 73-106.

Givnish, T. J. 1999. On the causes of gradients in tropical tree diversity. *Journal of Ecology* 87:193–210.

Grytnes, J. A., & Vetaas, O. R. (2002). Species richness and altitude: a comparison between null models and interpolated plant species richness along the Himalayan altitudinal gradient, Nepal. *The American Naturalist*, 159(3), 294-304.

Hammer, Ø. 2011. PAST V2.12 Reference manual. Natural History Museum University of Oslo. Oslo, Finlandia. 220p. Disponible en <http://www.nhm.uio.no/norlex/past/doc1.html>

Kappelle, M., Van Uffelen, J. G., & Cleef, A. M. (1995). Altitudinal zonation of montane Quercus forests along two transects in Chirripó National Park, Costa Rica. *Vegetatio*, 119(2), 119-153.

Kappelle, M., & Horn, S. P. (2005). *Páramos de Costa Rica*. Editorial INBio.

Lamprecht, H. (1989). *Silviculture in the tropics: tropical forest ecosystems and their tree species: possibilities and methods for their long-term utilization*. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit.

Lieberman, D., Lieberman, M., Peralta, R., & Hartshorn, G. S. (1996). Tropical forest structure and composition on a large-scale altitudinal gradient in Costa Rica. *Journal of Ecology*, 137-152.

Moreno, C. E. 2001. *Métodos para medir la biodiversidad*. M&T–Manuales y Tesis SEA, vol. 1. Zaragoza, ES. GORFI. 84 pp. Disponible en <http://entomologia.rediris.es/sea/manytes/metodos.pdf>

Mostacedo, B & Fredericksen, T. 2000. Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal. S.E. Santa Cruz, BO. 92 p. Disponible en <http://es.scribd.com/doc/53038497/20/Indices-de-similaridad>, consultado 20 Nov 2011.

QGIS Development Team. 2016. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>

Rahbek, C. 1997. The relationship among area, elevation, and regional species richness in Neotropical birds. *American Naturalist* 149:875–902.

Wang, G., Zhou, G., Yang, L., & Li, Z. (2003). Distribution, species diversity and life-form spectra of plant communities along an altitudinal gradient in the northern slopes of Qilianshan Mountains, Gansu, China. *Plant Ecology*, 165(2), 169-181.

Whitmore, T.C., 1989. Tropical forest nutrients, where do we stand? A tour de horizon. In: Proctor, J. Ed. , Mineral Nutrients in Tropical Forest and Savanna Ecosystems. Blackwell Scientific, Oxford, pp. 1–13

6.1.2 Artículo 2: Modelación de 47 especies nativas.

ESTE ARTÍCULO ESTÁ EN ELABORACIÓN PARA SER SOMETIDO A LA REVISTA BOSQUE.

Efecto del cambio climático en la flora del Parque Nacional Volcán Irazú (PNVI), Costa Rica basado en modelaciones a mediano y largo plazo mediante MaxEnt.

Autores: Mario Quesada-Quirós^a, Luis Guillermo Acosta-Vargas^{a*}, Dagoberto Arias-Aguilar^a, Alexander Rodríguez González^b

Resumen

La flora del Parque Nacional Volcán Irazú (PNVI) presenta en su mayoría páramo y representa el límite occidental de dichos ecosistemas en el continente. Además, aportan un alto valor de endemismo a Costa Rica debido a su composición de especies, diferentes características con relación al páramo Suramericano y los cambios drásticos en el clima. Es por ello que las predicciones del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) consideran estos sitios como prioridad de estudio para evaluar los efectos del efecto invernadero a mediano y largo plazo. Con el programa MaxEnt (algoritmo basado en máxima entropía) se logró determinar las áreas y las especies que pueden presentar cambios significativos al 2050 y 2070 (basado en proyecciones de Worldclim con Representative Concentration Pathways (RCP 4.5) utilizando el test de Jackknife y el Área bajo la curva (AUC) para la validación y análisis de los modelos). Con un total de 47 especies estudiadas, las variables con mayor aporte fue la temperatura promedio en el trimestre más frío, temperatura media en el trimestre más lluvioso y la temperatura máxima del periodo más caliente. A nivel Nacional, los sectores más perjudicados y que tienden a la extinción del nicho ecológico para la mayoría de especies es al Noroeste de la Cordillera que divide el país. En PNVI las zonas más susceptibles es al Sur del Parque, sector conocido como Prusia y al Norte de los cráteres principales, zona con grandes pendientes y difícil acceso. A partir de esta información, se recomienda una acción rápida y eficiente en el proceso de adquisición de los terrenos que se encuentran privados como Hacienda Retes y parte de Finca Padua, ya que representan las áreas de mayor vulnerabilidad en las proyecciones a futuro y necesitan ser estudiadas con mayor detenimiento. Del total de especies, apenas cinco presentan aumento en las proyecciones a futuro, es decir, un desplazamiento favorable para la colonización de sitios potenciales a ocupar.

Palabras clave: cambio climático, MaxEnt, biogeografía, nicho ecológico, Parque Nacional Volcán Irazú

INTRODUCCIÓN

El cambio climático cambia la composición de la atmósfera terrestre, se atribuye directa o indirectamente a las actividades humanas (IPCC 2007). Mayormente dichos cambios son atribuidos al ser humano por su contribución al aumento de emisión de gases de efecto invernadero, los que provocan una tendencia de aumento de la temperatura global (IPCC 2001).

Además la introducción considerara:

- Pérdida de hábitats (simulaciones y efectos en lugares frágiles)
- Biogeografía... Islas altitudinales: teoría Islas, fragilidad, importancia al monitoreo del CC
- Modelos de predicción (Wordclim, 4.5 RCP) MaxEnt, Pro y contras
- ¿Total de sp plantas vasculares en CR, áreas silvestres en CR y su importancia en preservación de recursos en el futuro?

El objetivo de esta investigación es valorar el efecto del cambio climático para las plantas de páramo y su respuesta al riesgo de extinción local, capacidad de desplazamiento o adaptación a cambios a mediano o largo plazo.

MATERIALES Y METODOS

Descripción del sitio: El Parque Nacional Volcán Irazú (PNVI), es un volcán activo y el de mayor altitud de Costa Rica, con 3432msnm. Fue declarado parque nacional en 1955 y en 1998 se anexaron los terrenos que hoy día componen el sector Prusia; su extensión total es de 2000,36 ha constituida principalmente por plantaciones forestales, bosques primarios y secundarios (ACCVC & ONCA, 2008).

El parque se ubica en la Cordillera Volcánica Central, provincia de Cartago, cantón de Oreamuno entre los N 9°57' y N9°58' y W083°50' y W083°52'. La temperatura oscila entre los 3°C y 17°C y, precipitación media anual de 2158mm. Están representadas dos zonas de vida, Bosque Pluvial Montano y Bosque Muy Húmedo Montano, dentro de las cuales se albergan bosques montanos y de páramo. En esta área silvestre nacen varios ríos y quebradas que dan origen a las cuencas del Reventazón, Sarapiquí, Sucio y Toro Amarillo. La vegetación ha sufrido importantes alteraciones a lo largo de los años por las constantes erupciones volcánicas, en la actualidad se observa un crecimiento esparcido de plantas en los alrededores de los cráteres, mientras que en el resto del parque es posible encontrar

bosque primario como secundario, aunque la mayoría del bosque se encuentra en el lado Norte del Volcán, mientras que en el sector Sur predominan cultivos agrícolas (ACCVC & ONCA, 2008).

Además, se genera la información de las modelaciones para todo el territorio de Costa Rica, ubicada en las coordenadas geográficas 8° y 11° latitud norte; entre 83° y 86° longitud oeste, en una extensión aproximada de 51100 km² (ITCR, 2014) con el fin de establecer criterios de comparación con otros sitios que presentan características climáticas similares a PNVI.

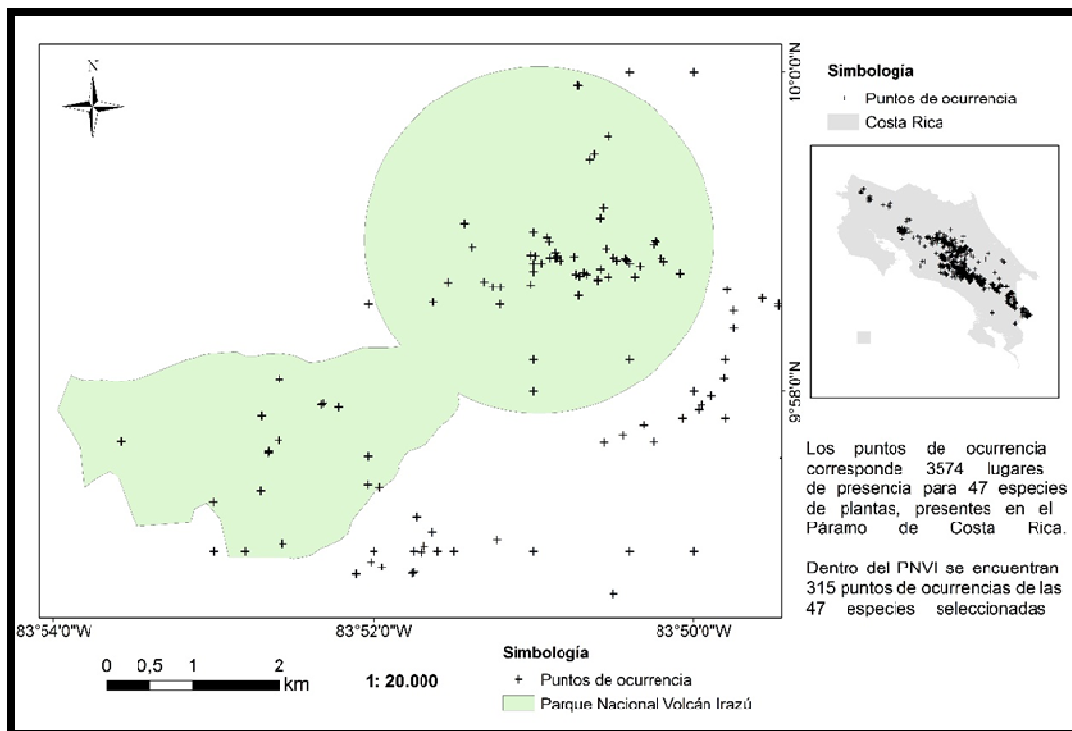


Figura 1. Ubicación de los datos de ocurrencias para 47 especies de plantas en el páramo en el Parque Nacional Volcán Irazú (PNVI) y en Costa Rica.

Selección de ocurrencias de especies estudiadas: Las informaciones correspondientes a la recopilación de las ocurrencias de las especies, provienen de tres fuentes de datos que contienen mayor información de flora en Costa Rica: Herbario Nacional de Costa Rica (CR) por medio de la página digital Ecobiosis, Herbario Missouri Botanical Garden, Missouri, USA (MO), Instituto Nacional de Biodiversidad (INBIO) y datos de campo de parcelas permanentes en el Parque Nacional Volcán Irazú establecidas entre los años 2014 y 2015.

Se eligieron 56 especies de plantas vasculares para realizar el análisis preliminar por medio de los siguientes criterios: endemismo, capacidad en la formación de rodales, importancia económica sobre usos de frutos comestibles, distribución restringida en Costa Rica y distribución restringida mundial. Sin embargo, solo se utilizó 47 especies cumplen con el tamaño mínimo de 20 ocurrencias por especie, para producir un modelo robusto, con valores estadísticos confiables. Aunque este número de especies seleccionadas es reducido para contemplar toda la diversidad encontrada cerca de los páramos, si representan una variedad representativa para contemplar los efectos del cambio climático y las consecuencias al futuro en los páramos de Costa Rica.

Fuentes de información: La información sobre las variables climáticas se obtuvo de Worldclim (Hijmans, Cameron, Parra, Jones & Jarvis, 2005) con una resolución espacial de 0.93 x 0.93 km equivalente a 0.86 kilómetros cuadrados (Cuadro 1). Todas las capas fueron modificadas al tamaño de Costa Rica para su análisis con el programa MaxEnt. Se utilizaron los escenarios climáticos de trayectorias de concentración representativas (RCP) 4.5 (estabilización) con predicciones realizadas al 2050 (promedio entre los años 2041-2060) y el 2070 (promedio entre los años 2061-2080), se utilizó todos los General Circulation Model (GCM) presentes en la página de Worldclim.

Cuadro 1. Variables ambientales utilizadas en MaxEnt para generar los modelos de nicho ecológico

Variables	Descripción
bio_1	Temperatura media anual(°C)
bio_2	Rango medio diurno (Media de la mensual (temperatura máxima temperatura mínima)(°C)
bio_3	Isotermalidad(Bio_2/Bio_7) x (100)(°C)
bio_4	Estacionalidad de la Temperatura (desviación estándar x100)(°C)
bio_5	Temperatura máxima del mes más cálido(°C)
bio_6	Temperatura mínima del mes más frío(°C)
bio_7	Rango anual de temperatura (bio_5 x bio_6)(°C)
bio_8	Temperatura media del cuarto más húmedo(°C)
bio_9	Temperatura media del cuarto más seco(°C)
bio_10	Temperatura media del cuarto más caluroso(°C)
bio_11	Temperatura media del cuarto más frío(°C)
bio_12	Precipitación anual(mm)
bio_13	Precipitación del mes más húmedo(mm)
bio_14	Precipitación del mes más seco(mm)
bio_15	Estacionalidad en las precipitaciones (Coeficiente de variación)(mm)
bio_16	Precipitación del cuarto más húmedo(mm)
bio_17	Precipitación del cuarto más seco(mm)
bio_18	Precipitación del cuarto más caluroso(mm)
bio_19	Precipitación del cuarto más frío.(mm)

Evaluación de los modelos

El programa utilizado para el modelamiento de especies corresponde a MaxEnt3.3.3k, funciona con algoritmos que predice el potencial de distribución de las especies con relación a condiciones ambientales conocidas y recopiladas en el tiempo (Phillips, Anderson y Schapire, 2006) y se considera como uno de los programas más eficientes en dichas predicciones (Elith

., 2006). Se calibró con las siguientes especificaciones para todos los casos: con los puntos de ocurrencia de visitas de campo y herbarios, el 75% de las ocurrencias para el entrenamiento del modelo y el 25% restante para realizar su respectiva validación, según sugieren varios autores (Alba-Sánchez et al, 2010). Además se configuró con un umbral de convergencia de 0,00001 y como límite superior de corrida un valor de 10000 interacciones según recomienda Phillips et al, (2006).

Los resultados de salida utilizados para MaxEnt se eligió el formato logístico ya que presenta facilidad para la interpretación en programas de sistemas de Información geográfica (Phillips & Dudík, 2008); para la visualización y configuración de las capas y mapas generados se utilizó y QGIS 2.8. Se convirtió las capas raster en binomial de presencia-ausencia utilizando umbrales de corte que maximiza la sensibilidad y la especificidad del modelo, de esta forma generar datos de distribución cercanas a las probabilidades reales de encontrar la especie en el sitio previsto.

Evaluación de los modelos

Fueron valorados mediante el cálculo del área bajo la curva (AUC). Los valores de AUC de 0,5 a 0,7 por lo general tienen una baja confianza, los valores de 0,7-0,9 tienen una aplicación útil en el modelo y los valores mayores a 0,9 tienen una alta confianza (Lobo, Jiménez-Valverde y Real, 2007) por esta razón se descartaron todos los modelos que dieron valores inferiores a 0,7 en el AUC.

Las variables climáticas son la combinación de temperatura y precipitación, por lo que pueden estar correlacionadas entre sí. Para comprobar la certeza y el aporte de cada variable de forma individual, se utilizó el test Jackknife el cual tiene como función principal correr cada modelo con cada variable por si sola para medir el aporte de la variable particular (Shcheglovitova y Anderson, 2013)

RESULTADOS

Existe gran variabilidad de comportamiento en todas las 47 especies seleccionadas en este trabajo para su análisis. Las especies *Erigeron irazuensis*, *Centropogon gutierrezii*, *Hydrocotyle torresiana*, *Monochaetum amabile* y *Myrrhidendron donnellsmithii* les favorece las proyecciones a futuro ya que tienen ganancia con respecto a la distribución

potencial actual. En todos los casos, las modelaciones en el PNVI se mantienen similares en su comportamiento, sin embargo, genera áreas de mayor adaptación cerca de Panamá y en el Parque Internacional La Amistad (PILA), lo que favorece la conexión con el país adyacente. También se tienen modelaciones muy abruptas en la pérdida de área con respecto a las proyecciones a futuro, un ejemplo claro es la especie *Ageratina anisochroma* que presenta un recorte general del 90% del área con base en la distribución potencial actual.

Las especies más críticas en la proyección al 2070 en el escenario RCP 4.5, donde el porcentaje de permanencia se reduce en casi 99% (es decir, al borde de la extinción) son *Archibaccharis irazuensis*, *Halenia rhyacophila*, *Solanum longiconicum* y *Werauhia ororiensis*. Para estas cuatro especies mencionadas, el criterio de selección fue la distribución Mundial restringida, formulando un recorte generacional en el PNVI y en todo el territorio de Costa Rica.

Cuadro 2. Estado de 47 especies de plantas de páramo, según las modelaciones de MaxEnt para la predicción de la distribución potencial actual, proyección al 2050 y 2070 en zonas altas de Costa Rica.

Especie	actual	2050	2050%	2070	2070%	selección
<i>Ageratina anisochroma</i>	2475,00	230,48	-90,69	236,50	-90,44	Restricción Mundial
<i>Ageratina ixiocladon</i>	792,06	706,92	-10,75	696,60	-12,05	Restricción en Costa Rica
<i>Ageratina kupperi</i>	169,42	81,70	-51,78	41,28	-75,63	Restricción Mundial
<i>Agrostis pittieri</i>	1734,62	1150,68	-33,66	158,24	-90,88	Endemismo
<i>Archibaccharis irazuensis</i>	834,20	344,86	-58,66	5,16	-99,38	Restricción Mundial
<i>Ardisia glandulosomarginata</i>	2546,46	1934,14	-24,05	316,48	-87,57	Restricción Mundial
<i>Buddleja nitida</i>	498,80	511,70	+2,59	188,34	-62,24	Restricción Mundial
<i>Castilleja irasuensis</i>	347,44	286,38	-17,57	13,76	-96,04	Endemismo

<i>Castilleja quirosii</i>	859,14	345,72	-59,76	310,46	-63,86	Restricción Mundial
<i>Centropogon gutierrezii</i>	390,44	552,12	+41,41	662,20	+69,60	Restricción Mundial
<i>Cestrum irazuense</i>	663,92	319,92	-51,81	417,96	-37,05	Endemismo
<i>Chusquea vulcanalis</i>	449,78	332,82	-26,00	87,72	-80,50	Restricción Mundial
<i>Comarostaphylis arbutoides</i>	1351,06	943,42	-30,17	699,18	-48,25	Rodales
<i>Diplostegium costaricense</i>	319,06	192,64	-39,62	177,16	-44,47	Restricción Mundial
<i>Erigeron irazuensis</i>	518,58	1076,72	+107,63	1441,36	+177,94	Restricción Mundial
<i>Fuchsia microphylla</i>	1458,56	280,36	-80,78	127,28	-91,27	Restricción Mundial
<i>Gunnera insignis</i>	5770,60	4228,62	-26,72	664,78	-88,48	Restricción Mundial
<i>Gunnera talamancana</i>	918,48	577,92	-37,08	462,68	-49,63	Restricción Mundial
<i>Halenia rhyacophila</i>	487,62	189,20	-61,20	7,74	-98,41	Restricción Mundial
<i>Hydrocotyle ribifolia</i>	996,74	417,96	-58,07	386,14	-61,26	Restricción en Costa Rica
<i>Hydrocotyle torresiana</i>	1730,32	2099,26	+21,32	2997,96	+73,26	Endemismo
<i>Hypericum irazuense</i>	229,62	176,30	-23,22	123,84	-46,07	Restricción Mundial
<i>Ilex pallida</i>	2309,96	1834,38	-20,59	1828,36	-20,85	Restricción Mundial

<i>Lepidium costaricense</i>	1378,5 8	235,64	-82,91	113,52	-91,77	Restricción en Costa Rica
<i>Lobelia irasuensis</i>	210,70	153,08	-27,35	106,64	-49,39	Restricción Mundial
<i>Lupinus costaricensis</i>	383,56	205,54	-46,41	24,94	-93,50	Restricción Mundial
<i>Maianthemum paludicola</i>	829,04	2,58	-99,69	175,44	-78,84	Endemismo
<i>Maytenus woodsonii</i>	369,80	208,12	-43,72	24,08	-93,49	Restricción Mundial
<i>Miconia schnellii</i>	1395,7 8	588,24	-57,86	1611,6 4	+15,47	Endemismo
<i>Monochaetum amabile</i>	960,62	1302,0 4	+35,54	1813,7 4	+88,81	Endemismo
<i>Monochaetum vulcanicum</i>	545,24	43,00	-92,11	14,62	-97,32	Endemismo
<i>Morella phanerodonta</i>	2142,2 6	2037,3 4	-4,90	1810,3 0	-15,50	Restricción Mundial
<i>Myrrhidendron donnellsmithii</i>	756,80	941,70	+24,43	888,38	+17,39	Restricción en Costa Rica
<i>Ocotea austinii</i>	4835,7 8	3152,7 6	-34,80	2489,7 0	-48,52	Restricción Mundial
<i>Psittacanthus schiedeanus</i>	2270,4 0	1375,1 4	-39,43	350,88	-84,55	Restricción Mundial
<i>Quercus costaricensis</i>	1351,0 6	1228,9 4	-9,04	1128,3 2	-16,49	Restricción Mundial
<i>Romanschulzia costaricensis</i>	5080,8 8	3145,8 8	-38,08	2580,0 0	-49,22	Restricción Mundial
<i>Senecio multivenius</i>	1692,4 8	170,28	-89,94	135,02	-92,02	Endemismo

<i>Solanum longiconicum</i>	1475,7 6	116,10	-92,13	19,78	-98,66	Restricción Mundial
<i>Solanum roblense</i>	2924,8 6	4728,2 8	+61,66	2475,0 8	-15,38	Endemismo
<i>Solanum vacciniiflorum</i>	1011,3 6	605,44	-40,14	1279,6 8	+26,53	Restricción Mundial
<i>Stachys pittieri</i>	3467,5 2	2068,3 0	-40,35	2806,1 8	-19,07	Endemismo
<i>Vaccinium consanguineum</i>	2153,4 4	2185,2 6	+1,48	1689,9 0	-21,53	usos
<i>Vaccinium floribundum</i>	473,86	251,12	-47,01	235,64	-50,27	usos
<i>Verbesina oerstediana</i>	4333,5 4	2722,7 6	-37,17	2329,7 4	-46,24	Restricción Mundial
<i>Weinmannia vulcanicola</i>	4496,0 8	2699,5 4	-39,96	1609,9 2	-64,19	Endemismo
<i>Werauhia ororiensis</i>	1148,9 6	67,94	-94,09	18,06	-98,43	Restricción Mundial

La distancia entre el Parque Nacional Volcán Irazú y Parque Nacional Volcán Turrialba (ubicado al este del PNVI) es de aproximadamente 10 kilómetros. Como se aprecia en la figura 2 la suma de todas las especies estudiadas disminuirá de forma considerable en número de especies que generan una conexión entre ambas Áreas Protegidas. Además se aprecia la concentración de todas las especies en las zonas aledañas al límite de los Parques, por lo tanto, las proyecciones a más largo plazo forman un acercamiento más notorio de dicha situación. Las zonas más susceptibles del PNVI, son el sector Sur conocido como Prusia y al Norte de los cráteres principales, zona con grandes pendientes y difícil acceso.

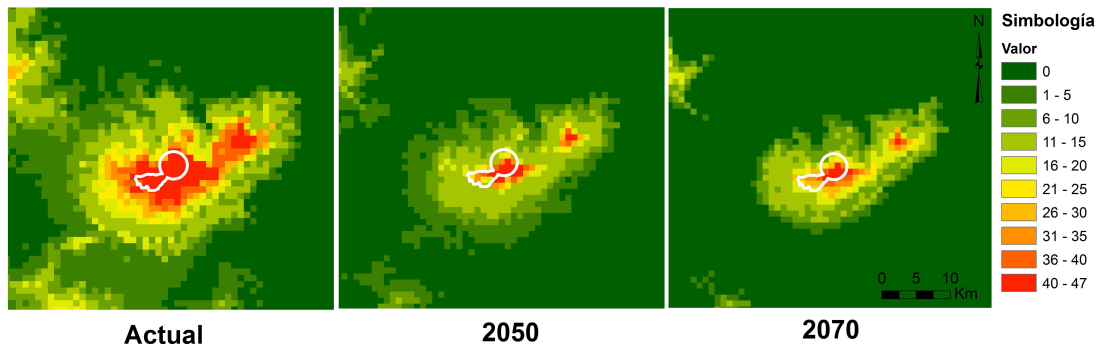


Figura 2. Modelación de la distribución actual, proyección del efecto del cambio climático a mediano y largo plazo para especies de plantas de páramo en el escenario RCP 4.5 dentro del Parque Nacional Volcán Irazú (PNVI).

En términos generales, las plantas presentan una reducción total en las partes altas al Noroeste del país con respecto a las modelaciones a futuro. Como se visualiza en el cuadro 3# el Parque Nacional Volcán Irazú y Parque Nacional Volcán Turrialba perderán las conexiones con otras áreas en el 2050 y 2070 lo cual produce una isla altitudinal sin posibilidad de intercambio y la seguridad del equilibrio ecológico. También zonas como Monteverde (con gran influencia de las condiciones climáticas de la vertiente pacífica) presentan cambios importantes en el futuro.

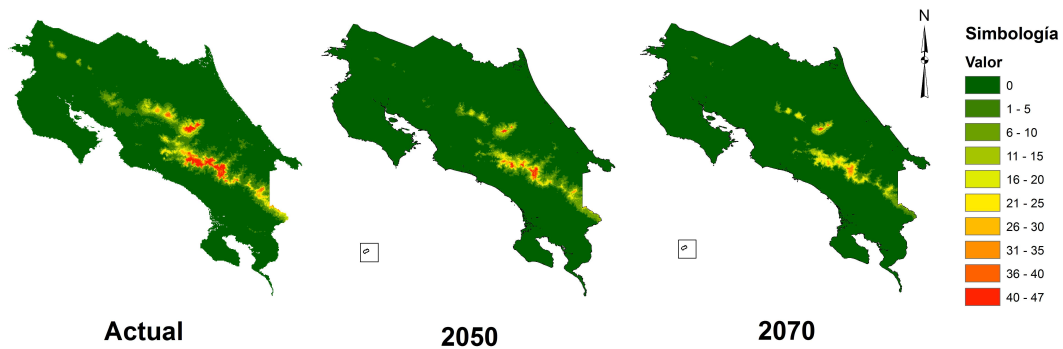


Figura 3. Modelación de la distribución actual, proyección del efecto del cambio climático a mediano y largo plazo para especies de plantas de páramo en el escenario RCP 4.5 en Costa Rica.

Las variables ambientales que aportaron la mayor contribución a la elaboración de los modelos de las especies reincidentes en tres características: Temperatura máxima del periodo más caliente (bio_5), temperatura media en el trimestre más lluvioso (bio_8) y temperatura promedio en el trimestre más frío (bio_11). Estas contribuciones derivan directamente de la temperatura, dejando de lado en su mayoría las variables de precipitación.

DISCUSIÓN: Aspectos a discutir.

- Cercanía e importancia que tiene el Volcán Turrialba con el Irazú para mantener la preservación de especies de plantas avifauna. Problemática con la invasión de la agricultura en las proximidades de los parques.
- Dificultad de colecta en estos ecosistemas, falta datos en algunos sectores del país.
- Plasticidad y adaptabilidad de las especies de páramo a los cambios extremos de temperatura actualmente y su nivel de respuesta a cambios más bruscos (algo no muy estudiado hasta el momento).
- Pérdida de nicho respecto a las simulaciones a futuro en las especies que se encuentran en el Noroeste de la cordillera de CR.
- Efectos naturales que pueden modificar y no fueron considerados en estas modelaciones (lluvia acida, erupciones, deslizamiento de terrenos inestables, etc)
- Especie con mayor amenaza a la extinción, especie con mayor oportunidad a la colonización (relación de variables o familias o criterio de escogencia)
- Afectación a las avifauna, como los quetzales o especies migratorias, y como consecuencia cambios en dispersión, turismo, degradación genética, llegada de nuevas especies colonizadoras.

AGRADECIMIENTOS

BIBLIOGRAFIA

ACCVC & Onca Natural. (2008). Plan Maestro del Parque Nacional Irazú. Costa Rica. 103 p

Alba-Sánchez, F., López-Sáez, J.A., Benito de Pando, B., Linares, J.C., Nieto-Lugilde, D. y López- Merino, L. (2010). Past and present potential distribution of the Iberian Abies species: A phytogeographic approach using pollen data and species distribution models. *Diversity and Distributions*, 16(2): 214- 228.

Hijmans, R., Cameron, S., Parra, J., Jones, P., y Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Internacional Journal of Climatology*, 25: 1965-1978pp

Elith, J., Graham, C., Anderson, R., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R., Huettmann, F., Leathwick, J., Lehmann, A. et al. (2006). Novel methods improve prediction of species distributions from occurrence data. *Ecography*, 29: 129-151.

IPCC. (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*, Cambridge, New York. 881p

IPCC. (2007) Cambio climático 2007: 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. IPCC, Ginebra, Suiza. 104 p

ITCR (Instituto Tecnológico de Costa Rica). (2014). Atlas de Costa Rica 2014 (CD-ROM). Cartago, Costa Rica, ITCR 1 CD-ROM.

Lobo, J.M., Jiménez-Valverde, A. y Real, R. (2007). AUC: a misleading measure of the performance of predictive distribution models. *Global Ecology and Biogeography*, 17(2):145-151.

Phillips, S., Anderson, R. y Sphapire, R. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(2006): 231-259.

Phillips, S. y Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31(2008): 161-175.

Shcheglovitova, M. y Anderson, R. (2013). Estimating optimal complexity for ecological niche models: A jackknife approach for species with small simple sizes. *Ecological Modelling*. 269(2013): 9-17.

6.1.3 Artículo 3: Modelación de nichos ecológicos

ESTE ARTÍCULO NACE DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN DEL ESTUDIANTE MARIO QUESADA QUIRÓS, ESTA EN ELABORACIÓN PARA SER SOMETIDO A LA REVISTA FORESTAL MESOAMERICANA KURÚ

El estudiante de la Escuela Forestal, Mario Quesada Quirós realizó su Trabajo Final de Graduación (TFG) para optar por el título de Licenciatura, con un tema muy relacionado a los objetivos del proyecto. Una vez concluido el proceso de defensa del TFG, el artículo será enviado a la revista.

Modelación de nichos ecológicos basado en tres escenarios de cambio climático para cinco especies de plantas en zonas altas de Costa Rica

El cambio climático genera diferentes respuestas en el patrón de distribución de la flora y fauna. Según las predicciones del Panel Intergubernamental del cambio climático (IPCC) por medio de modelos globales, las zonas que mayor estarán afectadas son las zonas altas, debido a los cambios drásticos en variables ambientales como la temperatura y precipitación. Por ello se realizaron modelos de nicho ecológico con MaxEnt (algoritmo basado en máxima entropía) para las especies: *Comarostaphylis arbutoides*, *Ilex pallida*, *Myrrhidendron donnellsmithii*, *Quercus costaricensis* y *Vaccinium consanguineum*. A partir de las proyecciones al 2050 y 2070 de Worldclim, se generó los modelos en los escenarios de *Representative Concentration Pathways* de: RCP 2.6 (mitigación), RCP 4.5 (estabilización) y RCP 8.5 (pesimista). Las variables de mayor aporte fue la temperatura máxima del periodo más caliente y la temperatura media en el trimestre más lluvioso; se utilizó el test de Jackknife y el Área bajo la curva (AUC) para la validación y análisis de los modelos. La mayoría de las modelaciones muestran una tendencia a la reducción del área a mediano y largo plazo en comparación al nicho ecológico actual. Sin embargo, la especie *Ilex pallida* tiene proyecciones favorables en la colonización de nuevas áreas para los RCP 2.6 y RCP 4.5. en lugares de mayor elevación que las actuales.

De las cinco especies en estudio, *Ilex pallida* es la única especie que presenta ganancia de todas las proyecciones en área de los escenarios RCP 2.6 y RCP 4.5 con respecto a la distribución potencial actual (Cuadro 1). Además es la especie que tiene una distribución más amplia con respecto a las otras con 3214.68 km² en la distribución actual.

Todas las proyecciones bajo el escenario RCP 8.5 tienden a disminuir en área en comparación a la distribución actual, siendo la especie más afectada el *Comarostaphylis arbutoides* con una pérdida de 942.56 km² para el año 2050 y 875.48 km² para el año 2070.

RESULTADOS: muestra

La especie *V. consanguineum* es conocida por su importancia alimenticia, los frutos en general del género *Vaccinium* sp. son muy cotizados para diferentes usos comestibles, conocido como arándanos. La disminución en el escenario RCP 8,5 equivale a casi la mitad del nicho ecológico actual (Figura 3), siendo de las pérdidas más importantes en todas las especies seleccionadas en este trabajo. Es así, donde pasa de 2153,44 km² a valores de 1371,7 km² en mediano plazo (año 2050) y baja a 933,1 km² a largo plazo (año 2070).

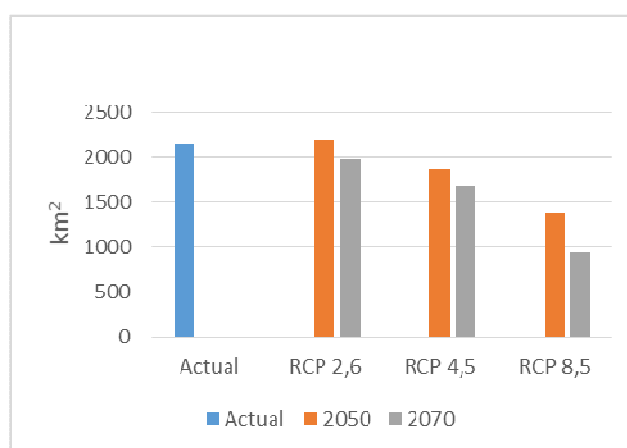


Figura 1. Distribución del área potencial en Costa Rica para la especie *V. consanguineum* de importancia por sus usos, en los escenarios RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5; proyectados al 2050 y 2070 con MaxEnt.

6.2 Capítulo 2

Resultados del objetivo específico 2

6.2.1 Modelaciones de 7 especies con potencial invasor

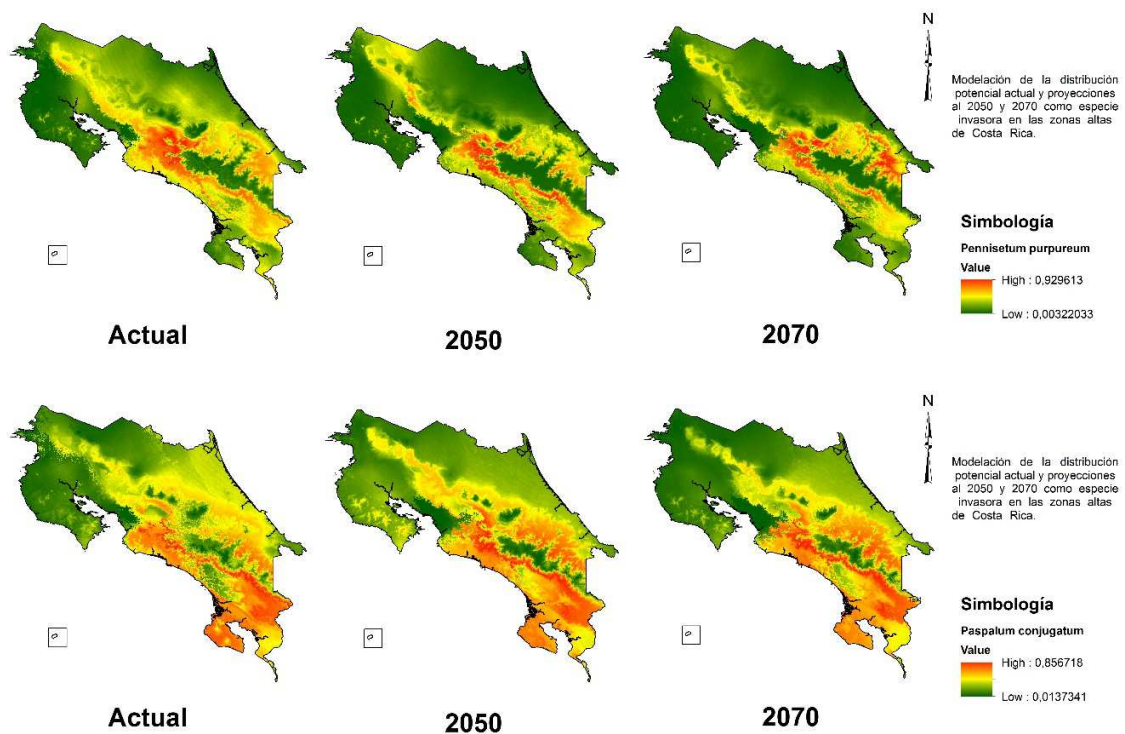
Las especies invasoras representan en la mayoría de los casos, un problema de equilibrio ecológico en el ecosistema, ya que tienen características de ser muy agresivas, rápida reproducción y amplitud de rangos de plasticidad de la especie ante cambios drásticos en las variables climáticas como la temperatura y precipitación. Las proyecciones a mediano y largo plazo se realizaron bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5, según el quinto informe de Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC).

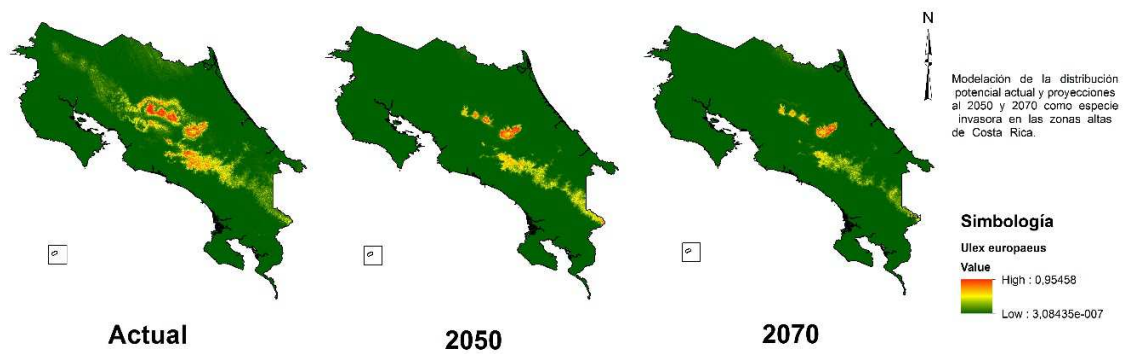
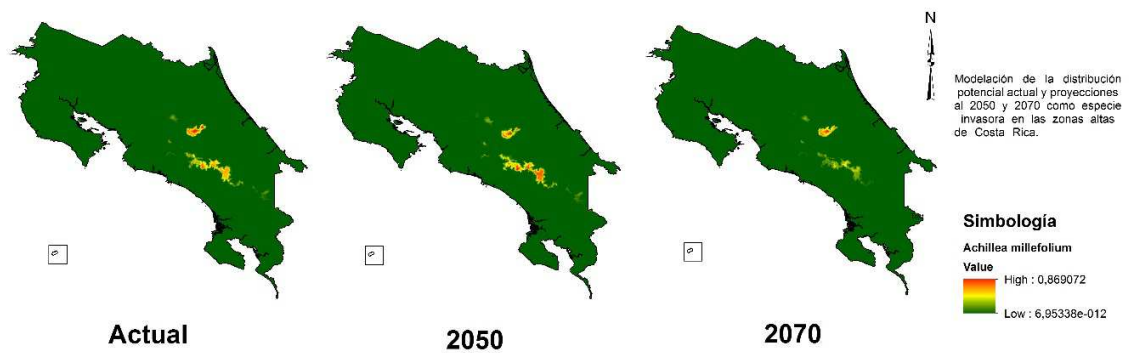
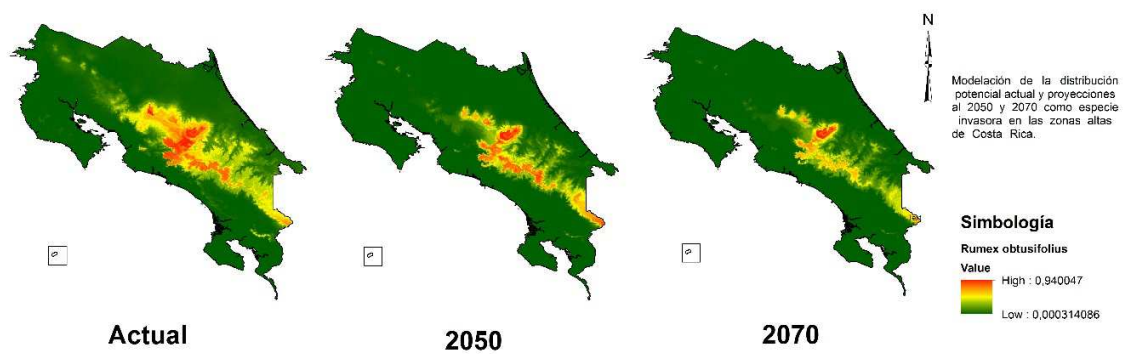
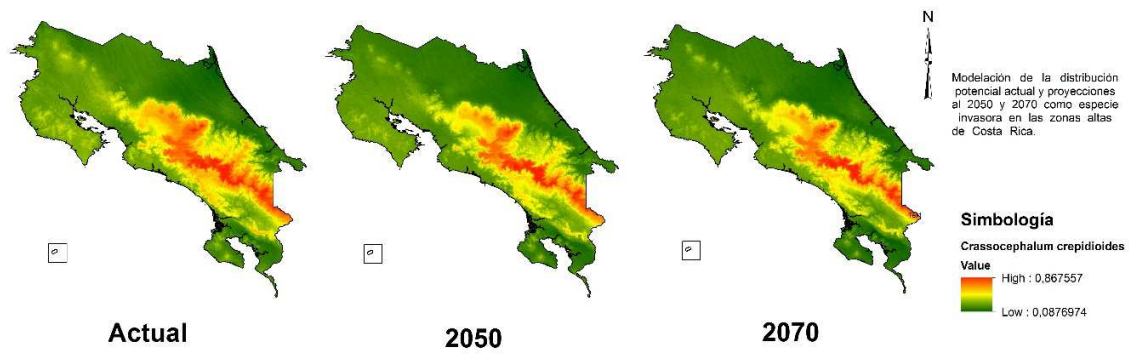
Según las modelaciones realizadas, las especies *Paspalum conjugatum* y *Pennisetum purpureum* no presentan un riesgo dentro del Parque Nacional Volcán Irazú (PNVI), ya que tienen un comportamiento en desarrollarse en partes más bajas. Por lo tanto, afectación se

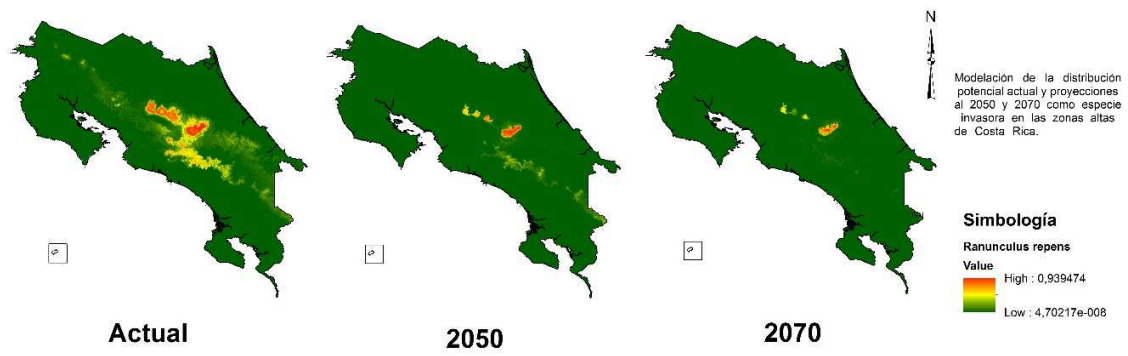
puede provocar en zonas colindantes con incidencia en ambas vertientes del país sin afectar los ecosistemas del Parque.

Caso contrario sucede con las especies *Crassocephalum crepidioides* y *Rumex obtusifolius* las cuales tienen amplia distribución en las partes media y altas del país. Estas especies se deben considerar como de alta prioridad en vigilancia, ya que el ingreso de las especies mencionadas puede alterar el orden de los ecosistemas actuales.

El comportamiento de adaptación, según los modelos elaborados, sugieren que las especies *Ulex europaeus*, *Achillea millefolium* y *Ranunculus repens* prefieren condiciones climáticas de zonas altas. Como se aprecia en las figuras, las tres especies tienen una fuerte vinculación con el Parque Nacional Volcán Irazú. Por lo tanto se recomienda realizar inspecciones de campo y trabajos posteriores para validar el posible ingreso de estas plantas al Parque. En el caso de *U. europaeus* es una especie invasora de gran impacto en diferentes lugares del mundo, de todas las especies antes mencionadas, *U. europaeus* debe ser manejada con mayor detenimiento y procurar la propagación, según respaldan muchas publicaciones realizadas de dicha especie.







6.3 Capítulo 3

Resultados del objetivo 4: Divulgación

6.3.1 Libro: Flora del macizo del Irazú

Presentación

Desde el inicio del Proyecto se inició con toda la información para una publicación formal como libro. El libro reúne la descripción botánica de las especies de flora más comunes del PNVI. No existe una obra que trate de la flora del páramo y subpáramo. El propósito de esta obra es contribuir al conocimiento de la biodiversidad de la zona por parte de los pobladores y que a su vez sea de referencia para estudios específicos. La obra viene a llenar un vacío de información sobre la biodiversidad en una zona de alto interés turístico. La está especialmente dirigida a:

- Investigadores, profesores y estudiantes que tengan relación e interés
- Personal encargado de la educación ambiental
- Público en general y visitantes del parque que quieran conocer más de la biodiversidad del parque.

Este libro está totalmente actualizado y la bibliografía es la más reciente. Además, la mayor parte proviene de las colecciones del Departamento de Historia Natural del Museo Nacional y de colecciones de campo de los investigadores. Se han introducido fuentes muy recientes que han incrementado sustancialmente la información que se pone a disposición de los usuarios.

El libro es material para consulta por parte de personal científico, profesores y estudiantes. También será de gran utilidad para guías de turismo y los interesados en conocer más sobre la biodiversidad de este parque nacional. También resulta interesante a todo público por la cantidad de fotografías con contiene.

La obra tiene mucha riqueza gráfica con imágenes propias y especialmente los mapas elaborados mediante sistemas de información. Cada especie tiene su descripción taxonómica, distribución y aspectos ecológicos. Será de gran utilidad para otros investigadores que necesiten apoyarse en una descripción botánica de las especies de flora.

Se ha solicitado a la Editorial Tecnológica de Costa Rica, que la obra también esté disponible en formato electrónico y se valore convertirla al inglés.

A continuación, se presenta un extracto del contenido del libro, una muestra de las imágenes que lleva y la carta de trámite en la Editorial Tecnológica de Costa Rica.

FLORA DEL MACIZO VOLCÁN IRAZÚ



Alexander Rodriguez G.
Dagoberto Arias Aguilar

Tabla de contenido

ACTINIDIACEAE	
....	9
Saurauia rubiformis Vatke.....	9
ADOXACEAE	
... 10	
Viburnum costaricanum (Oerst.) Hemsl.	10
Viburnum venustum C. V. Morton.....	11
ALSTROEMERIACEAE	
... 12	
Bomarea hirsuta (Kunth) Herb.	12
AMARANTHACEAE	
.. 13	
Iresine diffusa Humb. & Bonpl. ex Willd.	13
APIACEAE	
... 14	
Eryngium carlinae F. Delaroche.....	14
Hydrocotyle ribifolia Rose & Standl.	15
Hydrocotyle mexicana Schltl. & Cham.	16
Hydrocotyle torresiana Rose & Standl.	17
Myrrhidendron donnell-smithii J.M. Coult. & Rose.....	18
Osmorhiza mexicana Griseb.	19
APOCYNACEAE	
... 20	
Tassadia obovata Decne.	20
AQUIFOLIACEAE	
... 21	
Ilex pallida Standl.	21
/	
/	
/	

SOLANACEAE.....	
...160	
Cestrum aurantiacum Lindl.	160
.....	
Cestrum irazuense	
Kuntze.....	161
Cestrum poasanum Donn.	
Sm.....	162
Cestrum rugulosum	
Francey.....	163
Jaltomata procumbens (Cav.) J.L.	
Gentry.....	164
Schultesianthus leucanthus (Donn. Sm.) Hunz.	
.....	165
Solandra brachycalyx	
Kuntze.....	166
Solanum aphyodendron S.	
Knapp.....	167
Solanum chrysotrichum	
Schltldl.....	168
Solanum macrotonum	
Bitter.....	169
Solanum nigrescens M.Martens &	
Galeotti.....	170
Solanum pubigerum	
Dunal.....	171
Solanum roblense	
Bitter.....	172
SYMPLOCACEAE.....	
.173	
Symplocos serrulata	
Bonpl.....	173
URTICACEAE.....	
..174	
	Urtica leptophylla
Kunth.....	174

Saurauia rubiformis Vatke
MOCO, MOQUILLO

Descripción

Arbusto o árbol pequeño, entre 2-5(-10) m de altura; savia acuosa y más o menos mucilaginoso; sin estípulas. Hojas simples, alternas, espiralmente arregladas; peciolo 1.8-6 cm de largo; lámina 10-32 cm de largo y 5-15.5(-21) cm de ancho, obovada a ampliamente oblanceolada. Inflorescencias axilares, tirseiformes. Flores con 5 pétalos blancos, fusionados en la base. Frutos son bayas globosas, entre (6-)9-12 mm de diámetro; semillas numerosas.

Esta especie se caracteriza por ser un arbusto o arbolito de pequeño porte, por sus hojas simples, alternas, con el margen dentado, la nervadura pinnada, con nervios secundarios numerosos, el envés por lo general pubescente, y por sus flores con estambres numerosos y amarillos. Las flores se definen como ocultamente unisexuales (plantas perfectas bisexuales pero funcionalmente dioicas),

Distribución

- Ecosistemas: En áreas abiertas como potreros, orillas de camino o bordes de bosque, también en vegetación secundaria como charrales.
- Costa Rica: En bosque húmedo, pluvial y de roble, entre (500-)700-2050(- 3000) msnm, en la vertiente Caribe de la Cordillera de Guanacaste, en ambas vertientes de las Cordilleras de Tilarán, Central y de Talamanca.
- Mundo: México (Chiapas), Guatemala, Honduras, Costa Rica y Panamá.

Fenología

Florece entre febrero y octubre.

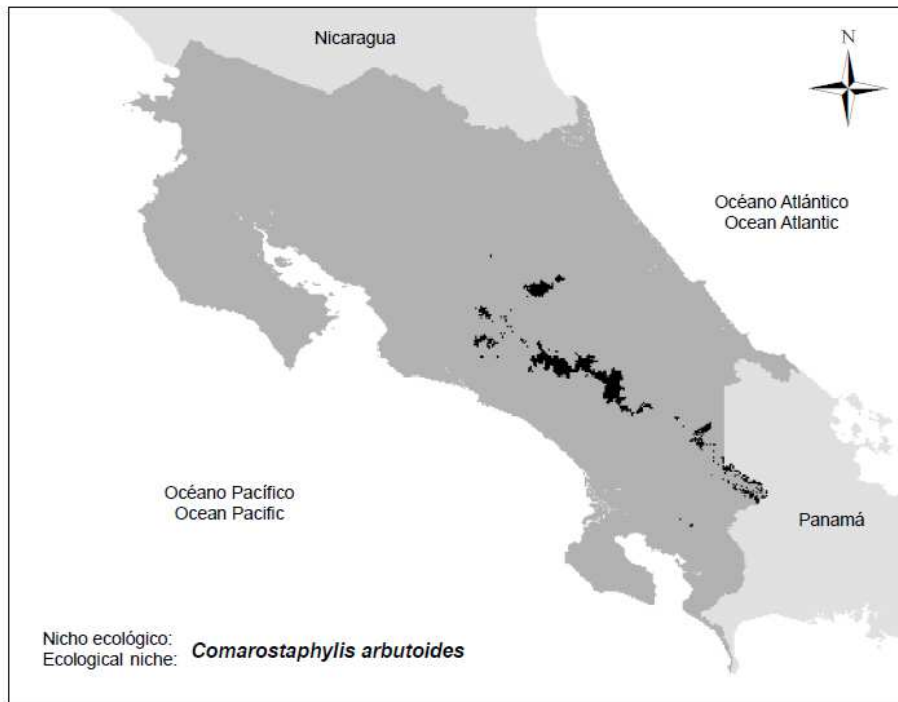
Usos

Sus frutos abayados son comestibles, con una pulpa succulenta, mucilaginoso y dulce. Por el porte llamativo del árbol lo utilizan de manera ornamental

Bibliografía

- González, L. 2005. Árboles y arbustos comunes del Parque Internacional la Amistad. Editorial INBio. Heredia. Costa Rica. 288p.
- Grayum, M.H. (en prep.). Actinidiaceae. In: Hammel, B.E.; Grayum, M.H.; Herrera, C.; Zamora, N. (eds.). Manual de Plantas de Costa Rica. Monogr. Syst. Bot. Missouri Bot. Gard.
- Kelly, L.M., S. 2011. Actinidaceae. Flora Mesoamericana treatment. Unpublished.

Mapas de distribución nacional



Muestra de fotografía





Editorial Tecnológica
de Costa Rica

impulsando el desarrollo científico y tecnológico

TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Cartago, 06 de junio del 2016
ET 325-2016

Señores
Alexander Rodríguez
Dagoberto Arias
Presente

Estimados señores:

Para los efectos correspondientes le transcribo el acuerdo tomado por el Consejo Editorial de la Editorial Tecnológica de Costa Rica, en su **sesión 386-16**, celebrada el **31 de mayo del 2016**, y que textualmente dice:

4.6 Libro "Flora del Macizo Volcán Irazú" de los autores Alexander Rodríguez y Dagoberto Arias

Se conoce solicitud para obra nueva por parte de los señores Alexander Rodríguez y Dagoberto Arias titulada "Flora del Macizo Volcán Irazú".

El señor Arias expone la obra ante los miembros del Consejo Editorial, acto seguido se retira de la sesión a las 10:07 a.m. con el fin de que la presidenta del Consejo, la señora Maribel dé lectura a la información complementaria, así como la justificación de la misma. Se analiza, se discute y se acuerda:

ACUERDO EN FIRME:

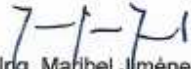
1. Se acuerda enviar la obra a evaluación.

Atentamente,



Editorial Tecnológica
de Costa Rica

TEC | Tecnológico
de Costa Rica


Irig. Maribel Jiménez Montero
Presidenta del Consejo Editorial
Editorial Tecnológica de Costa Rica

6.3.2 Artículo 1: Descripción de dos comunidades boscosas en el gradiente altitudinal del Parque Nacional Volcán Irazú, Costa Rica.

Autores: Luis Guillermo Acosta-Vargas^{a*}, Dagoberto Arias-Aguilar^a, Mario Quesada-Quirós^a, Alexander Rodríguez González^b

El Parque Nacional Volcán Irazú (PNVI), es uno de los picos más altos de Costa Rica; constituye una isla altitudinal y es uno de los pocos sitios con asociación vegetal conocida como páramo. El objetivo de la investigación fue describir la estructura y composición del bosque montano y subpáramo del PNVI. Se establecieron tres parcelas 1000 m² por tipo de bosque, se midió diámetro y altura a todos los árboles con $d \geq 5$ cm. El análisis de cluster demostró que ambas comunidades son diferentes; para la muestra el bosque montano reportó 20 especies, mientras el subpáramo seis especies; *Comarostaphylis arbutoides* es la especie de mayor importancia para ambas comunidades. La diversidad alfa para el bosque montano y el subpáramo fueron respectivamente para el índice de Shannon 2,09 y 1,02 y, de 0,19 y 0,49 para el índice de dominancia. En ambos bosques las distribuciones diamétricas se ajustan al modelo de J invertida, el subpáramo reportó diámetros menores que el montano; el área basal para el bosque montano fue de 31,68 m²ha⁻¹ y para el subpáramo de 4,67m²ha⁻¹. Respecto al dosel, el bosque montano alcanzó los 21 m de altura y definió tres estratos; el subpáramo alcanzó los 8 m y no diferenció estratos. El PNVI, por su condición de isla altitudinal, representa un sitio de alto valor para la conservación y la investigación de la comunidad vegetal del subpáramo.

6.3.3 Artículo 2: Efecto del cambio climático en la flora del Parque Nacional Volcán Irazú (PNVI), Costa Rica basado en modelaciones a mediano y largo plazo mediante MaxEnt

Autores: Mario Quesada-Quirós^a, Luis Guillermo Acosta-Vargas^{a*}, Dagoberto Arias-Aguilar^a, Alexander Rodríguez González^b

La flora del Parque Nacional Volcán Irazú (PNVI) presenta en su mayoría páramo y representa el límite occidental de dichos ecosistemas en el continente. Además, aportan un alto valor de endemismo a Costa Rica debido a su composición de especies, diferentes características con relación al páramo Suramericano y los cambios drásticos en el clima. Es por ello que las predicciones del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) consideran estos sitios como prioridad de estudio para evaluar los efectos del efecto invernadero a mediano y largo plazo. Con el programa MaxEnt (algoritmo basado en máxima entropía) se logró determinar las áreas y las especies que pueden presentar cambios

significativos al 2050 y 2070 (basado en proyecciones de Worldclim con Representative Concentration Pathways (RCP 4.5) utilizando el test de Jackknife y el Área bajo la curva (AUC) para la validación y análisis de los modelos). Con un total de 47 especies estudiadas, las variables con mayor aporte fue la temperatura promedio en el trimestre más frío, temperatura media en el trimestre más lluvioso y la temperatura máxima del periodo más caliente. A nivel Nacional, los sectores más perjudicados y que tienden a la extinción del nicho ecológico para la mayoría de especies es al Noroeste de la Cordillera que divide el país. En PNVI las zonas más susceptibles es al Sur del Parque, sector conocido como Prusia y al Norte de los cráteres principales, zona con grandes pendientes y difícil acceso. A partir de esta información, se recomienda una acción rápida y eficiente en el proceso de adquisición de los terrenos que se encuentran privados como Hacienda Retes y parte de Finca Padua, ya que representan las áreas de mayor vulnerabilidad en las proyecciones a futuro y necesitan ser estudiadas con mayor detenimiento. Del total de especies, apenas cinco presentan aumento en las proyecciones a futuro, es decir, un desplazamiento favorable para la colonización de sitios potenciales a ocupar.

6.3.4 Artículo 3: Modelación de nichos ecológicos basado en tres escenarios de cambio climático para cinco especies de plantas en zonas altas de Costa Rica

El estudiante de la Escuela Forestal, Mario Quesada Quirós realizó su Trabajo Final de Graduación para optar por el título de Licenciatura, con un tema muy relacionado a los objetivos del proyecto. El siguiente es un extracto del trabajo elaborado, el cual está en miras para ser publicado en la revista indexada: Revista Forestal Mesoamericana Kurú.

Presentación

El cambio climático genera diferentes respuestas en el patrón de distribución de la flora y fauna. Según las predicciones del Panel Intergubernamental del cambio climático (IPCC) por medio de modelos globales, las zonas que mayor estarán afectadas son las zonas altas, debido a los cambios drásticos en variables ambientales como la temperatura y precipitación. Por ello se realizaron modelos de nicho ecológico con MaxEnt (algoritmo basado en máxima entropía) para las especies: *Comarostaphylis arbutoides*, *Ilex pallida*, *Myrrhidendron donnellsmithii*, *Quercus costaricensis* y *Vaccinium consanguineum*. A partir de las proyecciones al 2050 y 2070 de Worldclim, se generó los modelos en los escenarios de *Representive Concentration Pathways* de: RCP 2.6 (mitigación), RCP 4.5 (estabilización) y RCP 8.5 (pesimista). Las variables de mayor aporte fueron la temperatura máxima del periodo más caliente y la temperatura media en el trimestre más lluvioso; se utilizó el test de Jackknife y el Área bajo la curva (AUC) para la validación y análisis de los modelos. La mayoría de las modelaciones muestran una tendencia a la reducción del área a mediano y largo plazo en comparación al nicho ecológico actual. Sin embargo, la especie

Ilex pallida tiene proyecciones favorables en la colonización de nuevas áreas para los RCP 2.6 y RCP 4.5. en lugares de mayor elevación que las actuales.

De las cinco especies en estudio, *Ilex pallida* es la única especie que presenta ganancia de todas las proyecciones en área de los escenarios RCP 2.6 y RCP 4.5 con respecto a la distribución potencial actual (Cuadro 1). Además, es la especie que tiene una distribución más amplia con respecto a las otras con 3214.68 km² en la distribución actual.

Todas las proyecciones bajo el escenario RCP 8.5 tienden a disminuir en área en comparación a la distribución actual, siendo la especie más afectada el *Comarostaphylis arbutoides* con una pérdida de 942.56 km² para el año 2050 y 875.48 km² para el año 2070.

6.3.5 Participación en XVIII Congreso de Ciencia, Tecnología y Sociedad

Se realizará una charla tipo conferencia en el *XVIII Congreso de Ciencia, Tecnología y Sociedad*. Esta décimo octava edición del congreso, se ejecutará en la ULATINA, en San Pedro, San José en los días 1 al 3 de setiembre del 2016. El congreso es una actividad enfocada en la formación de educadores, orientadores, productores educativos y otros interesados en el mejoramiento de la educación costarricense, con una asistencia aproximada de 500 profesionales.

La idea fundamental es compartir conocimiento actualizado para motivar la innovación en las aulas, además, implementar el uso de la tecnología que potencie el desarrollo intelectual y emocional de los estudiantes que se encuentren interesados en la parte de ingeniería, ciencias naturales, entre otras.

Resumen

El tema es parte de un proyecto de investigación realizado en el Tecnológico de Costa Rica en el período 2014-2015. Queremos compartir generalidades de la realidad de nuestros bosques y la importancia de protegerlos para combatir el cambio climático. Además, comunicar algunos resultados de la investigación, donde se realizaron simulaciones a mediano y largo plazo en árboles de zonas altas de Costa Rica. Al mismo tiempo, dar a conocer diferentes fuentes de información para la búsqueda datos confiables y de fácil acceso, para comprender los efectos del cambio climático en diferentes escenarios del calentamiento global.

6.3.6 Participación: 60 aniversario del Parque Nacional Volcán Irazú

Como parte de las actividades programadas para festejar el 60 aniversario de la fundación del Parque Nacional Volcán Irazú y Volcán Turrialba, el estudiante asistente Mario Quesada Quirós, realizó una exposición al público en general del proyecto. La actividad se efectuó en Prusia, el día 23 de julio del 2015. Además, se contó con la presencia de

profesores de la Escuela Forestal, Alejandro Meza y Gustavo Torres con otras contribuciones del evento.

6.3.7 Exposición en Comité Técnico Parque Nacional Volcán Irazú

El día 25 de setiembre del 2015, en el edificio del Ministerio de Agricultura y Ganadería ubicado en Tierra Blanca, Cartago, se realizó una exposición general de la metodología y los alcances del proyecto. En la actividad, estuvieron presentes personal del Parque, municipalidades, corredor biológico, otras universidades, MAG, ICE, MINAE, etc. La actividad fue realizada por el estudiante Mario Quesada Quirós, asistente del Proyecto

6.3.8 Taller Maestría

En las instalaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica se realizó un taller el día 27 de febrero 2016, dirigido a profesionales en Recursos naturales denominada: “Modelación en la distribución de especies: nicho ecológico mediante Maxent”. La actividad fue realizada por el estudiante Mario Quesada Quirós, asistente del proyecto.

6.3.9 Giras Curso Hidrología Forestal

Como parte de giras del curso de Hidrología Forestal, impartidas en el Instituto Tecnológico de Costa Rica, por parte de la Escuela Forestal, se realizaron dos giras de campo al Parque Nacional Volcán Irazú con el fin de conocer y analizar las parcelas permanentes que fueron establecidas. Dicha actividad se ejecutó en octubre del 2014 y octubre del 2015. La actividad fue realizada por el estudiante Mario Quesada Quirós, asistente del proyecto acompañado por el profesor del curso, Dorian Carvajal Vanegas.

6.3.10 Taller Técnico

El Taller Técnico, se realizará dentro del marco del Comité Técnico del ACCVC-SINAC, en donde se presentarán los resultados obtenidos del proyecto enfatizando sobre las medidas como Área de Conservación para asegurar la conservación de la biodiversidad mediante la adaptación y mitigación del cambio climático.

La coordinación se hizo con el Ing, Roger Arroyo, Administrador del PNVI. La fecha está confirmada para el 23 y 24 de junio y esta sujeta a especio en la agenda, de no haber espacio se tiene el compromiso del PNVI, a agendarla para la próxima fecha de Comité Técnico.

7 Anexos

Consultar en el CD:

- Bases de datos
- Modelaciones para las 47 especies nativas.
- Modelaciones para las 8 especies invasoras.
- Fotografías
- Capas para la ubicación de las PPM
- Presentaciones realizadas
- Muestra del libro.