

Estado actual y potencial de invasión de *Ulex europaeus* L. en el Parque Nacional Volcán Poás, Alajuela, Costa Rica

Current status and invasion potential of *Ulex europaeus* L. in the Poas Volcano National Park, Alajuela, Costa Rica

Jonathan Aguilar Leiva¹

Recibido: 15/04/2024

Aceptado: 12/07/2024

Abstract

A study of the invasive exotic species *Ulex europaeus* was carried out in the protected wildlife area known as Poás Volcano National Park, specifically in two sites, Potrero Grande and Colinas Verdes. Ten transects were established for data collection where a total of 39 circular sampling plots of five meter radius were placed, for a total sampled area of 3063.1 m². In each plot, the vegetation present was surveyed, identifying plant species, cover, height, type of habit, as well as the amount of light in the center of each plot. Additionally, using MaxEnt software and geographic information systems, a climatic niche model for *Ulex europaeus* in its native area was created and estimated for an area of interest, in this case Costa Rica, generating a potential climatic niche model. The results showed that high luminosity, the presence of disturbed areas, proximity to roads, and low temperature ranges were the factors that best explained the establishment and development of this invasive species. The climatic niche modeling for Costa Rica and its Area under the curve (AUC) of 0.916 demonstrated a high level of accuracy in predicting areas with climatic conditions similar to the region where *Ulex europaeus* is native. Sites such as the Central Volcanic Mountain Range and the Talamanca Mountain Range, are shown to be vulnerable to the invasion of this species if actions measures are not applied.

Keywords: Biological Invasions, Costa Rica, Ecological niche model.

1. Consultor independiente, Cartago, Costa Rica. jonaaguilar13@gmail.com

Resumen

Se realizó un estudio acerca de la especie exótica invasora *Ulex europaeus* en el área silvestre protegida conocida como Parque Nacional Volcán Poás, específicamente en dos sitios, Potrero Grande y Colinas Verdes, para la recolecta de datos se establecieron diez transectos y sobre estos un total 39 parcelas circulares de muestreo de cinco metros de radio, para un área muestreada de 3063,1 m², en cada parcela se censó la vegetación presente identificando la especie, el recubrimiento, cobertura, altura, el tipo de hábito, así como la luminosidad en el centro de cada una de estas, adicionalmente con el uso del software MaxEnt y de sistemas de información geográfica se realizó un modelo de nicho climático para *Ulex europaeus* en su área nativa y este se proyectó para un área de interés, en este caso Costa Rica, obteniendo así un modelo de nicho climático potencial, los resultados revelaron que la alta luminosidad, la presencia de áreas alteradas, la cercanía a carreteras, además de rangos de temperatura bajos son los factores que mejor explicaron el establecimiento y desarrollo de esta especie, el modelado de nicho climático para Costa Rica y su AUC (Área bajo la curva o AUC por sus siglas en inglés) de 0.916 demostraron un nivel de precisión alto en la predicción de zonas con condiciones climáticamente similares a la región donde *Ulex europaeus* es nativa, sitios como la Cordillera Volcánica Central y la Cordillera de Talamanca, se muestran como vulnerables ante la invasión de esta especie si no se aplican medidas de control.

Palabras clave: Invasiones biológicas, Costa Rica, modelo de nicho ecológico.

Introducción

A lo largo de la historia de la humanidad, al mismo tiempo que inician las migraciones, el ser humano ha actuado como agente de dispersión intencional o accidental de plantas y animales [1]. En el siglo XIX la liberación intencional de especies no nativas era una actividad muy común, pues se realizaba con fines para alimentación, estética [2], medicinal, energía, agua, materias primas, recreación, satisfacciones espirituales, inspiración artística, entre otros [3]. En la actualidad se puede decir que la liberación intencional de especies no nativas tiende a disminuir debido a los exacerbados impactos asociados a introducciones previas [2], impactos que hoy se conocen como invasiones biológicas. Sin embargo, es necesario la aplicación de técnicas novedosas de prevención, ya que las nuevas tecnologías de transporte y la movilidad de los seres humanos siguen facilitando estas introducciones involuntarias.

El éxito de estas invasiones se debe a las respuestas rápidas, complejas y diversas de cada especie ante el cambio climático [4]. Las especies invasoras a menudo poseen rasgos y características que las dotan de gran adaptabilidad ante los cambios medioambientales [5] y con ello a una gran variabilidad de ecosistemas. Las invasiones biológicas constituyen un componente muy severo del cambio global [6], [7], [8] y [9] y a su vez se consideran uno de los principales factores que influyen en la pérdida de biodiversidad [10], [1], [8] y [3].

La evidencia científica sugiere que las plantas exóticas introducidas que se vuelven invasoras pueden modificar profundamente los ecosistemas donde se establecen [1], presentando un deterioro de los hábitats debido a que se encuentran libres de competidores [3], muestran desplazamiento de especies nativas, cambios en los ciclos de nutrientes, transmisión de enfermedades, daños en infraestructuras [9], procesos de hibridación y contaminación genética, alteraciones de las redes de interacción entre especies de la comunidad [10] y muchos otros impactos negativos ecológicos, sociales y económicos [11].

Si bien tanto la flora como la fauna introducida pueden llegar a comportarse como especies invasoras después de una serie de procesos; la invasión biológica es el producto de la dinámica interna y capacidad invasora que caracteriza a la especie y susceptibilidad de invasión que presenta el hábitat como receptor [12]. Sin embargo, el estudio de las invasiones biológicas y sus efectos sobre los ecosistemas es un campo relativamente poco desarrollado [10], el cual abre nuevas oportunidades para la investigación que permiten estudiar los procesos en la medida que éstos se desarrollan [8].

Estudios enfocados en esta área ofrecerían información relevante para la prevención y detección temprana de especies invasoras, al identificar tanto el nivel actual de invasión como el nivel potencial futuro [7]. En esta línea es donde se ubica el presente trabajo, tuvo como objetivos; analizar variables poblacionales clave como indicadores del estado de invasión de *Ulex europaeus* en las zonas invadidas del Parque Nacional Volcán Poás, registrar las condiciones ambientales que determinan la abundancia de la especie invasora *Ulex europaeus* en el Parque Nacional Volcán Poás y construir un modelo de distribución potencial para Costa Rica de la especie *Ulex europaeus* a partir de un modelo climático en el área nativa. Esto para contribuir en la generación de información para prevenir futuros focos de invasión y visualizar posibles recomendaciones para el manejo.

Materiales y métodos

Estado de invasión de *Ulex europaeus* en el Parque Nacional Volcán Poás

Para la recolección y posterior análisis de las variables clave de la población de *Ulex europaeus*, se realizó una gira de campo inicial con el objetivo de identificar los sitios exactos donde actualmente se encuentra la especie. Para esto se hicieron recorridos por las carreteras y calles que dan acceso al parque, así como los senderos, quebradas y ríos ubicados dentro del sitio. Durante el recorrido se buscaron tanto individuos aislados como parches poblacionales de mayor tamaño y cada uno de los avistamientos de la especie fue registrado mediante un punto en GPS.

Una vez identificadas y delimitadas las zonas con poblaciones activas de la especie, se ubicaron 10 transectos con longitud variable (de acuerdo con el tamaño del foco de invasión), dispuestos de forma perpendicular desde el borde de la carretera principal o sendero y separados 50 m uno del otro. En cada transecto se establecieron como mínimo tres parcelas circulares de muestreo con un radio de 5 m (78,54 m²), una en la parte superior, otra en la mitad y la última en la parte inferior del transecto. En el caso de la primera y última parcela, se ubicaron a 1 m de distancia del borde de la carretera y del borde del bosque.

En cada parcela se censó la vegetación, principalmente los individuos de *U. europaeus*. Para ello, se registró información de las variables de la especie tales como altura total, porcentaje de cobertura o recubrimiento, presencia de rebrotes y presencia de regeneración natural.

Adicional al censo de *Ulex europaeus*, se muestreó de forma simultánea el resto de vegetación presente en

Cuadro 1. Escala de valores de medición abundancia-dominancia de especies en el muestreo de recubrimiento vegetativo con la metodología Braun-Blanquet.

Table 1. Ranking of abundance-dominance scores of species for vegetation cover sampling using the Braun-Blanquet method.

Escala	Valor
r	uno solo
+	más de uno
1	menos de 5 %
2	5 % al 15 %
3	25 % al 50 %
4	50 % al 75 %
5	igual o mayor al 75 %

el área de estudio, esto con el objetivo de tener una idea clara de con qué otras especies de plantas podría estar desarrollando alguna interacción, para ello se censaron aquellas especies de árboles o arbustos que se encontraron cercanas a las comunidades, parches e individuos aislados de la especie de estudio.

Los datos se analizaron mediante el programa Infostat, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) entre sitios y posteriormente entre parcelas. Además, se construyeron gráficos y tablas para describir el hábito y la clasificación del resto de vegetación muestreada durante los recorridos por las parcelas y transectos. Esta información se completó con una búsqueda bibliográfica para así describir la vegetación del parque junto con las comunidades de *Ulex europaeus*.

Potencial de invasión y factores asociados del Parque Nacional Volcán Poás

Condiciones ambientales en las que se desarrolla Ulex europaeus

Durante el trabajo de campo se realizó un registro de las variables climáticas (precipitación, radiación solar, temperatura, humedad relativa) y, geográficas (relieve, altitud, zonas de vida). Esta información se complementó y comparó con registros de sitios donde la especie es nativa y en sitios donde se ha registrado como invasora.

Relación especie vs luminosidad (Luz PAR)

Según el criterio experto de tres profesionales del área de las ciencias (un biólogo y dos ingenieros forestales), la condición ambiental con la que más se relaciona el crecimiento de la especie de estudio es la luminosidad. Por esta razón se realizó un muestreo de recubrimiento de las especies desde el borde de la carretera hacia el interior del bosque, para medir la incidencia de la especie en relación con el porcentaje de luminosidad.

Para el muestreo se utilizaron los mismos transectos y parcelas descritas anteriormente. Además, se utilizó una escala modificada de la metodología Braun-Blanquet para estimar la dominancia de las especies (Cuadro 1). Esta metodología consistió en hacer una estimación visual de qué porcentaje de la parcela estaba cubierto por cada una de las diferentes especies presentes, incluyendo el *Ulex europaeus*. Esta estimación se realizó sobre cada uno de los estratos presentes en la parcela.

En el muestreo de campo, en el centro de cada parcela se estimó el recubrimiento de las especies anteriormente mencionado y se midió la luminosidad con un luxómetro. Esta última medición se realizó en un periodo de 3 horas, entre las 11:00 am y 1:00 pm, en condiciones de cielo

despejado cuando los rayos del sol son perpendiculares a la Tierra.

Características del paisaje

Para evaluar la relación de la especie exótica invasora (EEI) con el paisaje antropogénico, se analizó el tamaño de los parches o matorrales de *Ulex europaeus*, así como la distancia entre ellos y los centros poblados, ríos, senderos y carreteras de la zona. Para ello se siguió la metodología planteada por Sandoval Pulgarín [16], donde se establecieron varios tamaños para los parches de la especie en el área de estudio, posteriormente se realizó una clasificación por el área total registrada en cada parche, generando seis categorías principales.

1. Individuos aislados
2. Parches muy pequeños (1-10 m²) 35
3. Parches pequeños (10-200 m²)
4. Parches medianos (200-2000 m²)
5. Parches grandes (2000 m² -20 ha)
6. Parches muy grandes (mayores a 20 ha)

Es importante resaltar que este trabajo no siguió un diseño de muestreo para la recolección de la información de la especie, lo que registró fue presencia o ausencia de la especie invasora. Esto debido a que es la información que se requiere para alimentar el modelo matemático que se describirá posteriormente.

El análisis de los datos se realizó usando sistemas de información geográfica y las capas del Atlas Digital de Costa Rica. Se calcularon las distancias a las carreteras, senderos, ríos y poblados. Con esta información se hicieron pruebas de dispersión para cada caso y usando los valores de R² para sugerir o descartar la existencia de una correlación lineal en el comportamiento de los datos.

Modelación de nicho climático potencial en Centroamérica

Para la elaboración del modelo de nicho ecológico se utilizó el programa MaxEnt versión 3.4.4. Este programa requiere únicamente dos componentes: 1) datos o registros de presencia de la especie y 2) variables bioclimáticas. Lo que se hizo fue calcular las áreas potenciales para *Ulex europaeus* a partir de la distribución ya conocida en una serie de puntos; es decir, el área de distribución potencial en Costa Rica a partir de la modelación de un nicho ecológico nativo en Europa.

Los registros de presencia de la especie se tomaron de la página web de El Sistema Global de Información sobre Biodiversidad (<https://www.gbif.org/es/>), la cual cuenta con un registro de más de doscientos mil puntos de zonas en el mundo, donde se ha registrado la especie de estudio. Las variables bioclimáticas se tomaron de la página web WorldClim, la cual cuenta con un registro a modo de resumen de variables de temperatura y precipitación para toda la superficie terrestre a diferentes resoluciones espaciales y con las 19 variables necesarias para correr el modelo.

Calibración y preparación de datos

De las bases de datos del Sistema Global de Información sobre Biodiversidad GBIF, las cuales son archivos en formato Excel con información de la especie, se depuraron dejando únicamente el nombre de la especie y las coordenadas de ubicación (latitud y longitud). Además, se filtraron para el área de interés que inicialmente fue Europa en países como Portugal, España y las Islas Británicas donde la especie se reporta como nativa y en Noruega, Suecia, Polonia y Suiza donde se reporta como naturalizada.

De las 19 variables bioclimáticas, las cuales se tomaron de la página WorldClim, y que son archivos en formato ráster, fue necesario cortarlas para cada una de las áreas de interés (rango nativo y rango introducido). En este caso se probó cada una de las resoluciones siendo la de 10 minutos el píxel más grande (18 km²) y 30 segundos el píxel más pequeño (900 m²).

Con el programa MaxEnt versión 3.4.4 se realizaron varias corridas con todos los datos de ubicación de la especie y las 19 variables climáticas para el rango nativo, esto a modo de prueba y calibración del software, pues el objetivo de un modelo de distribución de nicho es crear una predicción parsimoniosa; es decir, aquella que explique mejor con la menor cantidad de variables.

Una vez realizadas varias corridas del modelo y analizados los datos de salida, se obtuvo la prueba jackknife, un gráfico de barras que muestra las variables con mayor peso y que ayudan a predecir mejor la presencia de la especie en el sitio de rango nativo. Para este caso se escogieron cuatro variables, las cuales fueron BIO4, 7, 9 y 11 (Estacionalidad de Temperatura, Rango Anual de Temperatura, Temperatura Media del Trimestre Más Seco y Temperatura Media del Trimestre Más Frío) respectivamente. A partir de aquí los siguientes análisis y modelos de predicción se corrieron únicamente con esas cuatro variables.

Los resultados de estos modelos fueron una serie de capas ráster que se interpretaron y analizaron mediante QGIS a modo de mapas de calor, estos mapas fueron

tanto para el área nativa como para el área introducida. Además, el programa generó una serie de gráficos y tablas los cuales sirvieron como base para la toma de decisiones.

Resultados

Estado de invasión y características de la población de *Ulex europaeus* en el PNVP

Composición de especies presentes en comunidades de *Ulex europaeus*: Durante los muestreos de individuos aislados y los recorridos por los transectos, se registró un total de 13 familias y 18 especies, siendo las más representativas Melastomataceae (3 especies), Fagaceae y Myricaceae (con 2 especies cada una). Sin embargo, familias como Escalloniaceae, Dicksoniaceae, Poaceae (con 1 especie cada una), fueron las más abundantes en cuanto a apariciones totales durante los muestreos con 29, 30 y 16 apariciones respectivamente.

Hábito de crecimiento de las especies registradas dentro de las parcelas de muestreo de *Ulex europaeus*:

Del total de especies vistas durante los recorridos por el área invadida, el hábito de plantas arbustivas fue el que presentó un mayor número de especies con 8 (44 %), seguido por un estrato arbóreo con 6 (33 %), un herbáceo con 3 (17 %) y por último el helecho con 1 (6 %), (Figura 2).

Clasificación de las especies: De las 18 especies encontradas en comunidades de *Ulex europaeus* durante de los muestreos realizados, se logró observar que 13 especies fueron nativas (72 %) y 5 especies exóticas (28 %).

Potencial de invasión y factores asociados

Clima: Según el Instituto Meteorológico Nacional y los registros históricos que poseen de la estación meteorológica ubicada en el PNVP, esta especie ha estado creciendo con unas temperaturas medias entre los 8,6°C y 15,6°C, una humedad de 93,5 % y una precipitación de 2730 mm anuales desde 2012.

Relación especie vs luminosidad (Luz PAR): En la siguiente figura se muestra el análisis realizado para la correlación de la especie versus la luminosidad presente en cada parcela, su estadístico R² cercano a siete demostró como a medida que aumenta la luminosidad en las parcelas, la presencia y dominancia de *U. europaeus* es mayor (0.6886).

Relación del paisaje antropogénico de los escenarios evaluados en acuerdo con el tamaño de los parches y los individuos aislados: Al realizar la agrupación del total de observaciones por categoría de tamaño, se observó

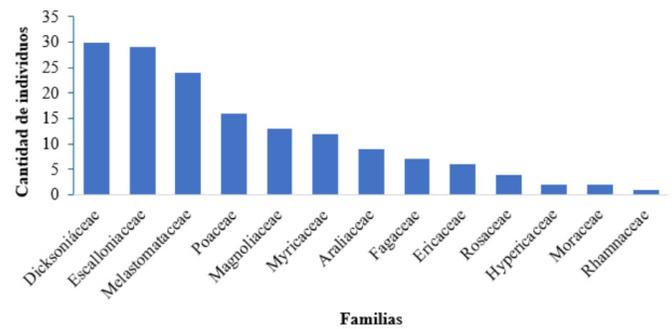


Figura 1. Composición de familias y cantidad de individuos presentes en comunidades con *Ulex europaeus* en el PNVP.

Figure 1. Plant family composition and number of individuals observed in vegetation communities where *Ulex europaeus* was present at the PVPN.

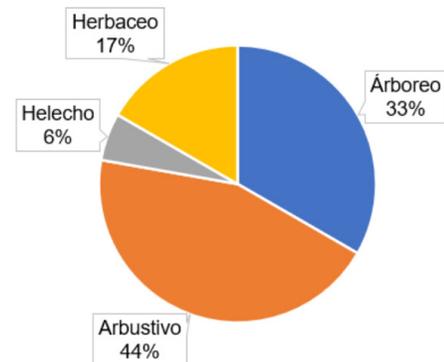


Figura 2. Hábito de crecimiento para las especies registradas dentro de las parcelas de muestreo de *Ulex europaeus*, en el PNVP.

Figure 2. Growth habit of species observed in sampling plots were *Ulex europaeus* presented in PVPN.

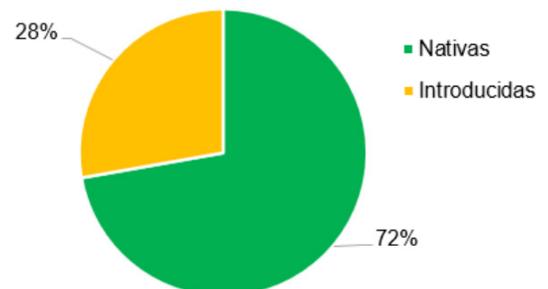


Figura 3. Clasificación de especies presentes en comunidades de *Ulex europaeus* en el PNVP.

Figure 3. Classification of plant species observed in communities where *Ulex europaeus* presented in PVPN.

que la mayor cantidad fue la de los individuos aislados (59 %). Esto debido a que, durante el recorrido por los senderos y carretera, fue más abundante su presencia en los bordes. Seguidamente los parches medianos con (22 %) y parches pequeños con (19 %). En este caso y debido a los rangos de categorías establecidas no se evidenciaron parches de tamaño muy pequeño, grande y muy grande.

Pruebas de dispersión: Según los gráficos de dispersión realizados para evaluar si existía alguna relación entre los tamaños de los parches y las distancias a carreteras, senderos, ríos y poblados, los resultados arrojaron valores de R^2 muy cercanos a cero, por lo cual se entiende que no existe una correlación lineal entre estas variables (Cuadro 2).

Modelización de nicho climático potencial

Predicción de nicho en el área nativa: Posterior a la selección de las variables bioclimáticas con mayor peso y la sección del mapa donde se centraría el modelo de la especie en su área nativa, la Figura 6 muestra a modo de mapa de calor, los sitios donde se estimó que es más probable climáticamente el desarrollo de la especie *Ulex europaeus*.

Una vez corrido el modelo, se obtiene la curva ROC, que evalúa la precisión del modelo basado en una matriz de confusión y el producto AUC el cual es un valor comprendido entre 0 y 1, y es la forma de medir la precisión del modelado realizado por MaxEnt, para este estudio en AUC fue de 0,916 (Figura 7), lo que es relativamente aceptable en temas de modelación de nicho, pues indica que la clasificación fue buena y por lo tanto bastante precisa.

La prueba Jackknife de AUC (Figura 8) aplicado a las cuatro variables elegidas anteriormente. Aquí se observa en color azul la contribución al modelo si se usara únicamente esa variable, en color turquesa el modelo en general sin esa variable y en rojo una mezcla de todas, cada una en contraste con el AUC.

Reproyección al área introducida: La intención de haber desarrollado un modelo de predicción para la especie en su área nativa fue darle una aproximación a MaxEnt de las condiciones óptimas donde la especie se desarrolla, para que con la misma información de variables bioclimáticas enfocadas en el área donde fue introducida, genere y prediga los sitios óptimos donde la especie puede desarrollarse. La Figura 9 muestra el mapa de calor generado por MaxEnt para Costa Rica, esta vez en una escala de 0 a 1, donde los valores más cercanos a 1 son los sitios con mayor probabilidad en cuanto a condiciones climáticas para el desarrollo de *Ulex europaeus*.

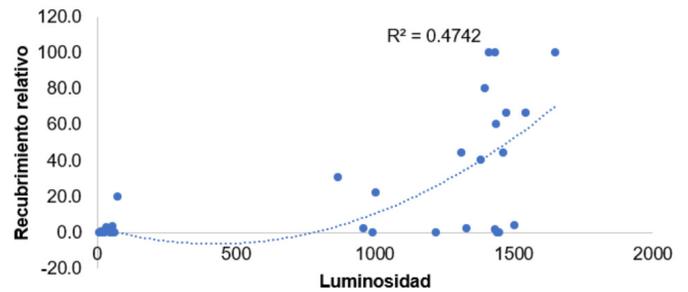


Figura 4. Correlación entre el recubrimiento relativo de *Ulex europaeus* versus la luminosidad en el PNVP.

Figure 4. Relationship between relative cover of *Ulex europaeus* and the amount of light at the PVNP.

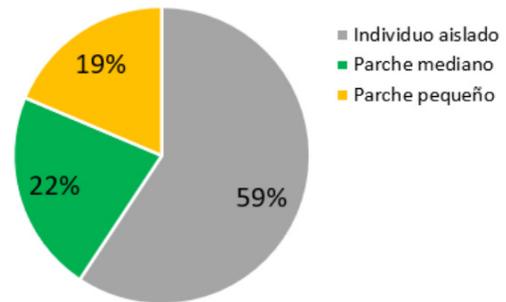


Figura 5. Agrupación de acuerdo con los tamaños de los parches e individuos aislados de *Ulex europaeus* en el PNVP.

Figure 5. Clustering according to patch size and isolated individuals of *Ulex europaeus* at the PVNP.

Cuadro 2. Valores de R^2 para los componentes del paisaje antropogénico estudiado y su relación con las categorías de tamaños de parches de *Ulex europaeus* en el PNVP.

Table 2. R^2 -squared values for the human landscape components evaluated and their relationship with patch size categories of *Ulex europaeus* at the PVNP.

Categorías	Valores de R^2
Carreteras	0,571
Senderos Botos	0,421
Sendero servidumbre	0,143
Poasito	0,399
Cabuyal	0,150
Altura	0,370
Hacienda Virginia	0,515
Ríos	0,379
Casetilla del parque	0,457

Discusión

Estado de invasión y características de la población de *Ulex europaeus* en el PNVP

Composición vegetativa y tipo de hábito en comunidades de *Ulex europaeus*: en cuanto a la composición vegetativa, los resultados señalan que la familia Melastomataceae fue la que presentó el mayor número de especies en conjunto con la especie de estudio (Figura 1). Según menciona [13], esta familia se encuentra muy ligada a bordes de carreteras, zonas de cultivo o pastoreo abandonadas, además de estar presente en las primeras etapas sucesionales de los bosques debido a su carácter pionero. Esto se relaciona con el área de estudio debido a que, al ser un sitio constantemente alterado, el establecimiento de *Ulex europaeus* se ve favorecido. Así mismo, la cercanía con la carretera y la gran incidencia de luz promueve el desarrollo de estas especies. Si bien la familia Poaceae también mostró una alta presencia en las parcelas de muestreo, esta gramínea se encuentra dispersa por todo el sitio de estudio.

La cualidad en donde predomina el hábito arbustivo por sobre el arbóreo en sitios de pastizales disturbados, podría propiciar que en estados sucesionales futuros estos puedan llegar a convertirse en matorrales densos de *Ulex europaeus* [14]. Sumado a esto es importante mencionar que la mayoría de las especies introducidas que se muestrearon en este estudio, son de hábito arbustivo (Figura 2), al igual que el *Ulex europaeus*. Esto puede indicar una señal de alerta, pues existe una teoría de estrategia de las plantas en donde se esperaría que especies exóticas superen a sus competidoras nativas ya que toleran mejor el stress de las primeras etapas de la sucesión [15] y esto especialmente en zonas perturbadas.

Potencial de invasión y factores asociados

Condiciones climáticas y geológicas en las que se desarrolla *Ulex europaeus*: La especie se ha estado desarrollando en temperaturas que van desde los 8,6 °C a 15,6 °C, una humedad de 93,5 % y una precipitación de 2730 mm. Si se comparan estas condiciones con las de otros sitios donde se reporta *U. europaeus* como especie invasora, se tiene el Macizo de Iguaque y la región del Alto Ricaurte de la Cordillera Oriental de Colombia, donde se registra en temperaturas de 7 °C a 18 °C, con una precipitación que varía entre los 700 a 1400 mm anuales [16]. Luego, en el estado de Morelos en México, el sitio cuenta con una temperatura entre los 4,8°C y 11,2°C y una precipitación de 1517 mm anuales [17]. Esto sugiere una gran adaptación a climas y diversidad de regiones por parte de la especie, lo que se justifica con el carácter de fácil adaptación del cual destacan muchas

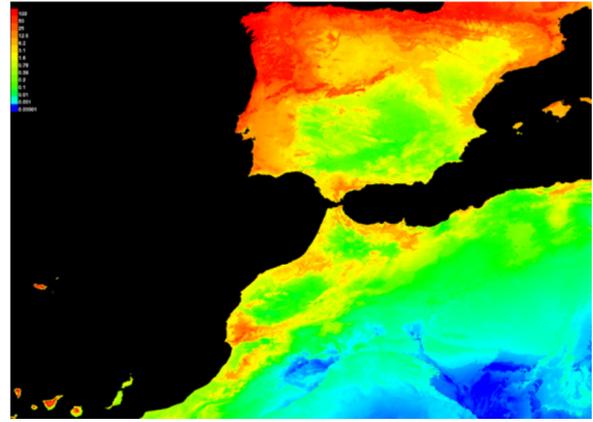


Figura 6. Modelo de predicción de nicho ecológico para *Ulex europaeus* en su área de distribución nativa.

Figure 6. Ecological niche model prediction for *Ulex europaeus* for its native distribution range.

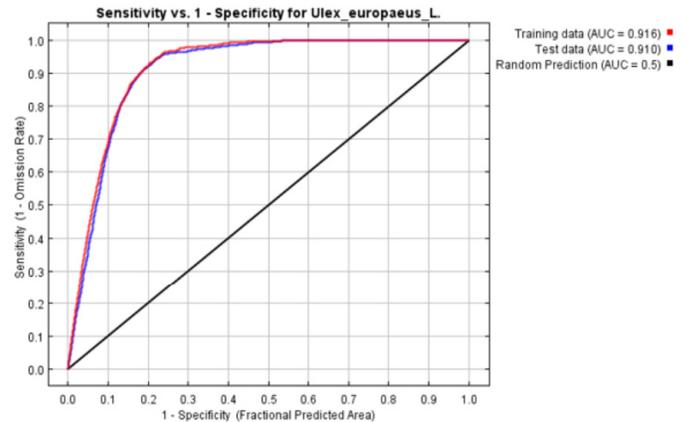


Figura 7. Curva ROC de Sensibilidad y Especificidad para el modelo de predicción de nicho ecológico de *Ulex europaeus* en su área de distribución nativa.

Figure 7. ROC curve for sensitivity and specificity for the ecological niche model prediction for *Ulex europaeus* for its native distribution range.

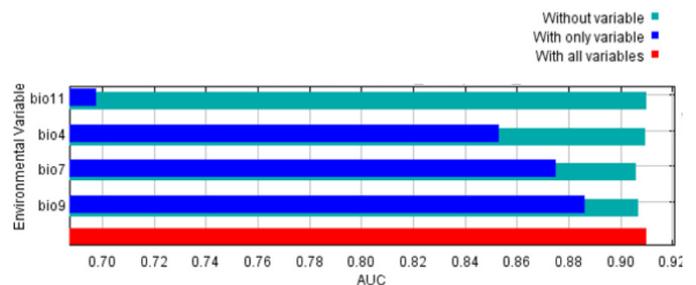


Figura 8. Prueba Jackknife de AUC para *Ulex europaeus* con las cuatro variables seleccionadas.

Figure 8. Jackknife test showing the AUC for *Ulex europaeus* for the four selected variables.

especies invasoras que logran ser exitosas en el proceso de invasión.

Relación especie versus luminosidad (Luz PAR):

como se pudo observar en la Figura 4 del análisis de correlación para el recubrimiento relativo de *Ulex europaeus* versus la luminosidad, en este gráfico se obtuvo un valor de R² muy cercano a 0,7 indicando una relación con el crecimiento, pero en especial con la presencia de esta especie, pues como se pudo observar entre mayor fue el nivel de luminosidad muestreado mayor fue el recubrimiento de *Ulex europaeus* en el sitio. Ahora, si bien las áreas de estudio son sitios con una alta incidencia de luz pues están ligados a un disturbio antropogénico, el mismo análisis demuestra que esta especie no se desarrolla de manera eficaz o de forma agresiva en zonas con un nivel bajo de luminosidad o debajo de la sombra, como por ejemplo hacia el interior del bosque.

Relación del paisaje antropogénico de los escenarios evaluados en acuerdo con el tamaño de los parches y los individuos aislados:

de todos los aspectos del paisaje antropogénico que se estudiaron, el que dio un valor de R² más alto fue con los poblados (Cuadro 2). Específicamente la de la Hacienda Virginia (0,515) que, aunque fue un valor relativamente bajo y con el cual no se puede explicar una correlación entre los datos, esta hacienda fue uno de los sitios donde se cree comenzó la invasión de esta especie. Por otra parte, el R² de la carretera (0,571), que, si bien estadísticamente es un valor bajo y por lo tanto no evidencia una relación entre las variables, históricamente los caminos o carreteras además de alterar la composición de paisaje y generar una gran movilidad de propágulos, crean hábitats con nuevas condiciones, los cuales por lo general son aprovechados por especies exóticas con potencial invasor [18].

Modelización de nicho climático potencial

Modelo del nicho en área nativa: En la representación del modelo para *Ulex europaeus* en su área nativa (Figura 6), el mapa de calor demostró en colores cálidos (naranjas y rojos) las zonas con las mejores condiciones climáticas previstas para la presencia y desarrollo de la especie, esta escala expresada con valores de 0 a 100. Representado en un rango de 50 y 100 están las zonas en el norte y oeste de España donde es muy probable encontrar esta especie. Y en menor escala hacia el centro del país, esto se apoya con la distribución citada por [19], donde menciona que *Ulex europaeus* se encuentra en mayores cantidades cerca de regiones marítimas atlánticas y es menos común hacia el interior de Europa.

Modelo predicción de nichos en área invadida: Sobre el mapa de predicción destacan cuatro zonas (Figura 7), estas son las predicciones de lugares en Costa Rica

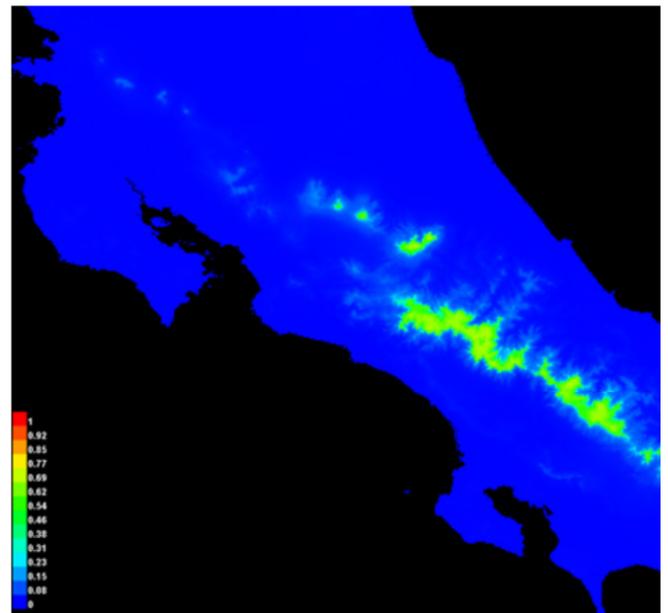


Figura 9. Modelo de predicción de nicho ecológico para *Ulex europaeus* en Costa Rica.

Figure 9. Ecological niche model prediction for *Ulex europaeus* in Costa Rica.

identificados por MaxEnt con condiciones climáticas similares al área de distribución de donde *Ulex europaeus* es nativa. Estos sitios corresponden a la Cordillera de Talamanca, la cual incluye sitios como el Parque Nacional los Quetzales, Parque Nacional Tapantí, Parque Nacional Chirripó y el Parque Internacional La Amistad. Así mismo el Parque Nacional Volcán Irazú y Volcán Turrialba, Parque Nacional Braulio Carrillo (sector Volcán Barva) y por último el Parque Nacional Volcán Poás.

Aquí es importante resaltar el hecho de que una de las zonas de predicción realizadas por MaxEnt fue justamente el Parque Nacional Volcán Poás, área de estudio del presente trabajo. Este hallazgo es de gran relevancia debido a que sustenta la modelación de nicho, el hecho de que una predicción aleatoria realizada por un software coincida en un lugar donde se tiene registro de la especie le da un grado de validez. Además, el estudio realizado por [20] apoya los resultados obtenidos en este trabajo, ya que también realizaron una modelación de nicho en escenarios de cambio climático para especies en zonas altas de Costa Rica, incluido el *Ulex europaeus*. Entre los resultados, las zonas vulnerables identificadas fueron muy similares a las obtenidas en este estudio, especialmente en las zonas altas y parques nacionales, incluido también el Parque Nacional Volcán Poás.

A causa de los resultados más relevantes obtenidos del presente estudio es importante tomar acciones e implementar medidas de prevención en los sitios

identificados como potenciales a ser invadidos por *Ulex europaeus*, ya que todos cuentan con características similares tanto en clima por estar ubicados en las zonas altas de Costa Rica, como en intervención humana pues todos son áreas protegidas con categorías de parque nacional, con un alto grado de visitación. Así mismo, coinciden con aspectos de cercanía a zonas desprovistas de vegetación, potreros abandonados y tierras del cultivo, con múltiples carreteras y un alto grado de luminosidad que hacen a estos sitios sumamente vulnerables a una posible invasión por *Ulex europaeus*.

Conclusiones

Por su historial, el Parque Nacional Volcán Poás reúne las condiciones climáticas para el desarrollo de *Ulex europaeus*, pues son similares a las regiones donde la especie es nativa. De igual forma las condiciones de sitio alterado, degradado, desprovisto de vegetación e inmerso en una matriz de usos múltiples del suelo típica de un paisaje antrópico con tierras agrícolas y ganaderas, lo hacen especialmente vulnerable.

La especie demostró tener una relación con los niveles de luminosidad, siendo así el borde de la carretera, senderos y potreros los sitios con mayor incidencia de luz y por tanto aquellos con mejores condiciones para su establecimiento. De la misma forma, se logró evidenciar que la especie no tolera sitios de sombra, por lo que no se le encontró en las parcelas de bosque y aquellas con una cobertura alta.

Aunque la relación con los diferentes escenarios de paisaje antrópico y los tamaños de los parches no fue la esperada, esto indicaría que la especie supera estas barreras de alguna otra forma y por sí sola logra establecerse y formar poblaciones grandes sin ayuda. Sin embargo, las carreteras y poblados deben reconocerse como sitios con un gran movimiento de germoplasma y por lo tanto, puntos calientes y de acceso a plantas invasoras.

La curva de sensibilidad vs especificidad y su derivado AUC, demostraron un nivel de precisión de 0,916 que indica una modelación buena y precisa para la especie en su área de distribución nativa.

La modelación de nicho ecológico proyectada para Costa Rica demuestra sitios con condiciones climáticas similares al área de distribución nativa de la especie, si se resalta el hecho de que *Ulex europaeus* ya está en uno de estos sitios y los demás son parques nacionales con condiciones y características similares, deja en evidencia la vulnerabilidad en la que se encuentran sometidas las áreas protegidas de no aplicarse medidas de prevención, control o erradicación para la especie.

Recomendaciones

Realizar estudios de interacciones biológicas entre *Ulex europaeus* y otras especies de flora y fauna del PNVP, esto ayudaría a identificar algún grado de competencia con las especies nativas de la zona y también la posibilidad de identificar si la especie ya tiene algún nicho en el ecosistema.

El software MaxEnt permite hacer modelaciones con otras variables además de los datos de información climática. Se puede agregar información de suelo, coberturas e incluso un modelo de elevación digital, esto ayudaría a aumentar la precisión de la modelación y la predicción.

Se recomienda poner un enfoque especial a la construcción, elaboración e implementación de medidas de prevención en las zonas vulnerables a la invasión por *Ulex europaeus* identificadas en este estudio, en especial sobre el Parque Nacional Volcán Irazú y Parque Nacional Volcán Turrialba, ya que ambos se encuentran en una matriz de paisaje antropogénico muy similar a la del sitio de estudio, así como ser parques altamente turísticos con altos niveles de visitación.

Referencias

- [1] N. Fuentes, P. Sánchez, A. Pauchard, J. Urrutia, L. Cavieres, & A. Marticorena, Plantas invasoras del centro de Chile, Guía_de_campo. Concepcion: Trama Impresores S.A. 2014
- [2] G. Darrigran, A. Vilches, & T. Legaralde. "Desinterés del pasado, decisiones del futuro: educación para prevenir las invasiones biológicas". Revista de Educación En Biología, Vol. 11, no. 1, Feb, pp. 39–52, 2008
- [3] A. Vilches, N. Arcaria, & G. Darrigran. "Introducción a las Invasiones Biológicas". Boletín Biológica. vol. 4, no.17, pp. 14–19, 2010
- [4] B. Gallardo, & L. Capdevila. "Cambio Climático y Especies Exóticas Invasoras en la Red de Parques Nacionales: diagnóstico, adaptación y gobernanza". Proyecto: BioCambio. 2018.
- [5] A. Estrada, I. Morales-Castilla, P. Caplat, & R. Early. "Usefulness of Species Traits in Predicting Range Shifts". Trends in Ecology and Evolution. vol. 31, no. 3, March, pp. 190–203, 2016.
- [6] F. De Alba, G. Born-Schmidt, J. Parpal, & P. Koleff. Principales retos que enfrenta México ante las especies exóticas invasoras. DF: Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública, 2017.
- [7] S. Fei, J. Phillips, & M. Shouse. "Biogeomorphic impacts of invasive species". Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics. vol. 45, pp. 69–87 Nov 2014.

- [8] A. Pauchard, C. Quiroz, R. García, C.B. Anderson, & M.T. Kalin Arroyo. "Invasiones biológicas en América Latina y el Caribe: tendencias en investigación para la conservación", en *Conservación Biológica: Perspectivas Desde América Latina*, J. A. Simonetti Zambelli, R. Dirzo. Santiago de Chile, Editorial Universitaria, 2011 pp. 79–94.
- [9] M. V. P. Vilà, F. Valladares, A. Traveset, L. Santamaría, & P. Castro. *Invasiones biológicas*, Madrid, CSIC, 2008.
- [10] P. Castro-Díez, F. Valladares, & A. Alonso. "La creciente amenaza de las invasiones biológicas" *Ecosistemas*, vol. 13, no. 3, pp. 61–68. 2004.
- [11] R. N. Mack, D. Simberloff, W. M. Lonsdale, H. Evans, M. Clout, & F. A. Bazzaz. "BIOTIC INVASIONS: CAUSES, EPIDEMIOLOGY, GLOBAL CONSEQUENCES, AND CONTROL". *Ecological Applications*, vol. 10, no. 3, Jun. pp. 689–710, 2000.
- [12] G. Darrigran, & C. Damborenea, C. Bio-invasión del mejillón dorado en el continente americano. Buenos Aires: Editorial de la Universidad Nacional de la Plata, 2006.
- [13] H. Valois-Cuesta, C. Martínez-Ruiz, & H. Quinto-Mosquera. "Revegetación natural de áreas afectadas por minería de oro en la selva pluvial tropical del Chocó, Colombia", *Biología Tropical*, vol. 70, no. 1, Oct, pp. 742–767. 2022.
- [14] H. E. Beltran-G, & J. I. Barrera-Cataño. "Caracterización de invasiones de *Ulex europaeus* L. de diferentes edades como herramienta para la restauración ecológica de bosques altoandinos, Colombia", *Biota Colombiana*, vol. 15, no. 2, Dic, 2014.
- [15] J. L. Hierro, J. L. Maron, & R. M. Callaway. "A Biogeographical approach to plant invasions: the importance of studying exotics in their introduced and native range", *Journal of Ecology*, vol. 93, Dic, pp. 5–15, 2004.
- [16] L. M. Sandoval Pulgarín. "Patrones y procesos de invasión de plantas en los alrededores del Macizo de Iguaque (Boyacá, Colombia)" Tesis para optar al título de: Magister en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional de Colombia, Boyacá. 2020.
- [17] E. Mosso-Mancilla, F. Lezama-Sánchez, A. Castillo-Gutiérrez, M. Flores Tolentino, E. Tovar-Sánchez, & J. R. Ramírez-Rodríguez. "Primer registro de *Ulex europaeus* (Fabaceae, Faboideae) en México". *Acta Botánica Mexicana*, vol. 128, Oct, pp. 1–17, 2021.
- [18] A. Lázaro-Lobo, & G. N. Ervin. "A global examination on the differential impacts of roadsides on native vs. exotic and weedy plant species". *Global Ecology and Conservation*, vol. 17, 2019.
- [19] H. Zwölfer. *Ulex europaeus* project - European investigations for New Zealand, Report No. 1. Delemont, Switzerland: Commonwealth Institute of Biological Control (CABI). 1962.
- [20] L. G. Acosta-Vargas, & D. Arias-Aguilar. "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", Centro de Investigación Forestal, Escuela de Ingeniería Forestal. 2016.