



**IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL 2020 EN LA DISTRIBUCIÓN
POTENCIAL DE ACHIRA (*CANNA INDICA* L.) EN COLOMBIA USANDO TRES
MODELOS DE CIRCULACIÓN GLOBAL DE LA FAMILIA DE ESCENARIOS DE
EMISIÓN A2**

SHIRLEY SOLANGHI CALDERÓN TORRES



**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL (CIAT)
AREA DE DECISIONES Y ANÁLISIS DE POLÍTICAS (DAPA)**

NEIVA, 2014



**IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL 2020 EN LA DISTRIBUCIÓN
POTENCIAL DE ACHIRA (*CANNA INDICA* L.) EN COLOMBIA USANDO TRES
MODELOS DE CIRCULACIÓN GLOBAL DE LA FAMILIA DE ESCENARIOS DE
EMISIÓN A2**

SHIRLEY SOLANGHI CALDERÓN TORRES

**Trabajo de grado
presentado como requisito parcial
para optar al título de
Ingeniera Agrícola**

Director:

**Colin Khoury
PhD. (c) Estudiante de Recursos Genéticos**

Codirector:

**Chrystian Camilo Sossa Arango
B. Sc. Asistente de Investigación**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL (CIAT)
AREA DE DECISIONES Y ANÁLISIS DE POLÍTICAS (DAPA)**

NEIVA, 2014

La memoria titulada “**Impacto del cambio climático para el 2020 en la distribución potencial de Achira (*Canna indica* L.) en Colombia usando tres modelos de circulación global de la familia de escenarios de emisión A2**” presentado por la estudiante **Shirley Solanghi Calderón Torres** para optar al título de Ingeniera Agrícola por la Universidad Surcolombiana, ha sido realizada bajo nuestra dirección en el marco de convenio general de cooperación académica entre el Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT y la Universidad Surcolombiana, quien reúne las condiciones adecuadas para construir su trabajo de grado, por lo que autorizamos al interesado para su disertación.

Neiva, Agosto de 2014

Colin Khoury

PhD. (c.) Estudiante de Recursos Genéticos – DAPA (CIAT)
Director Externo

Chrystian Camilo Sossa Arango

B. Sc. Asistente de Investigación – DAPA (CIAT)
Codirector Externo

Nota de Aceptación

MSc. Rodrigo Alberto Pachón Bejarano
Profesor asociado – Universidad Surcolombiana
Jurado

MSc. Carlos Emilio Reina Galeano
Profesor asociado- Universidad Surcolombiana
Jurado

Neiva, Agosto de 2014

Érase una vez

Había dos niños que patinaban sobre una laguna congelada. Era una tarde nublada y fría, pero los niños jugaban sin preocupación. Cuando de pronto, el hielo se reventó y uno de los niños cayó al agua.

El otro niño viendo que su amiguito se ahogaba debajo del hielo, tomó una piedra y empezó a golpear con todas sus fuerzas hasta que logró quebrarlo y así salvar a su amigo.

Cuando llegaron los bomberos y vieron lo que había sucedido, se preguntaron: ¿Cómo lo hizo?

El hielo está muy grueso, es imposible que lo haya podido quebrar, con esa piedra y sus manos ¡¡¡tan pequeñas!!!

En ese instante apareció un anciano y dijo: "Yo sé cómo lo hizo"...

¿Cómo? - Le preguntaron al anciano y él contestó: "No había nadie a su alrededor que le dijera que no se podía hacer".

"Si lo puedes imaginar, lo puedes lograr" (Albert Einstein) y "Si un hombre es perseverante, aunque sea duro de entendimiento, se hará inteligente; y aunque sea débil se transformará en fuerte" (Leonardo Da Vinci)

Se cuenta que en los años 20 cuando Albert Einstein empezaba a ser conocido por su Teoría de la Relatividad, era con frecuencia solicitado por las universidades para dar conferencias. Dado que no le gustaba conducir y sin embargo el coche le resultaba muy cómodo para sus desplazamientos, contrató los servicios de un chófer.

Después de varios días de viaje, Einstein le comentó al chófer lo aburrido que era repetir lo mismo una y otra vez.

- Si quiere -le dijo el chofer- lo puedo sustituir por una noche. He oído su conferencia tantas veces que la puedo recitar palabra por palabra.

Einstein estuvo de acuerdo y antes de llegar al siguiente lugar, intercambiaron sus ropas y Einstein se puso al volante.

Llegaron a la sala donde se iba a celebrar la conferencia y como ninguno de los académicos presentes conocía a Einstein, no se descubrió la farsa.

El chófer expuso la conferencia que había oído repetir tantas veces a Einstein.

Al final, un profesor en la audiencia le hizo una pregunta. El chófer no tenía ni idea de cuál podía ser la respuesta, sin embargo tuvo una chispa de inspiración y le contestó:

- La pregunta que me hace es tan sencilla que dejaré que se la responda la persona que se encuentra al final de la sala..., que es mi chófer.

"El verdadero hombre inteligente es el que aparenta ser tonto delante de un tonto que aparenta ser inteligente" (Albert Einstein).

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la madre naturaleza por lo que me brinda, al creador de todo lo que existe, el suelo fértil, los elementos agua , aire, fuego, el sol que nos ilumina, a la gravedad que nos mantiene y a las estrellas que nos hacen soñar. También a aquellos que me guiaron, enseñaron y sobre todo aquellos que me corrigieron en pro de ser una mejor persona, aunque les haya costado gran esfuerzo, a mis padres, hermanos, primos, tíos(as), compañeros(as), abuelos, amigos(as) y a todas las personas que se cruzaron en mi camino (ya sea haciendo fila para pagar alguna cuenta, viajando en bus o cruzando la cebr del semáforo), hasta aquellos que desde la distancia siempre nos dan lecciones.

La compañía, apoyo y ayuda de Chrystian Sossa, Rodrigo Pachón, Gladys Quino, Ingrid Vanegas, Jesús Hoyos, Colin Khoury, Nora Castañeda, Grupo CIAT, Universidad Surcolombiana, Fanny Llanos, Mario Trujillo, Renso Aragón, Kevin Torres, Astrid Araque, Jenny Fonseca, Tania Cárdenas, Rosa Álvarez, Nelcy Torres; Fabian Calderón; Leidy Laura, Manuel del Cristo, Diana Medina, Heriberto González, Stiven David, Linda Marcela, Mayten Torres, Diana Polanía, Leidy Ramírez, Daniel Castro, Jackeline Méndez, Cristian Manrique, Oscar Barrera, Fabian Perdomo, Tamara Torres; Yesid Rojas; Nataly Peña; Eduardo Mora; Jorge Ríos; Carlitos Flórez; Arturo Flórez; Eduardo Pastrana; Eduardo Valencia; Cecilia Cardozo, Aura Rojas y Ventura Torres, porque de una u otra manera siempre me enseñaron algo y contribuyeron a mi desarrollo como persona en esta etapa que finaliza.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|-------------|
| INDICE DE FIGURAS | iii |
| INDICE DE TABLAS | v |
| INDICE DE ECUACIONES..... | vi |
| INDICE DE ANEXOS..... | vii |
| GLOSARIO..... | viii |
| ABREVIATURAS Y ACRONIMOS..... | x |
| RESUMEN | xi |
| 1. Introducción | 18 |
| 1.1. Planteamiento del problema | 19 |
| 1.2. Objetivo general..... | 20 |
| 1.2.1. Objetivos específicos..... | 20 |
| 1.3. Esquema del documento | 20 |
| 2. Achira (<i>Canna indica</i> L.)..... | 21 |
| 2.1. Origen | 21 |
| 2.2. Taxonomía | 22 |
| 2.3. Raíz y tallo..... | 22 |
| 2.4. Sistema Foliar | 24 |
| 2.5. Inflorescencia | 25 |
| 2.6. Importancia agrícola..... | 26 |
| 2.7. Importancia socioeconómica..... | 28 |
| 3. Modelos de distribución de especies | 28 |
| 3.1. Nicho ecológico | 29 |
| 3.2. Modelación de Nicho Ecológico | 30 |
| 3.2.1. Construcción de Modelos de Distribución de especies | 31 |
| 3.3. Método Maxent | 32 |
| 3.3.1. Fundamentos Matemáticos de Maxent..... | 33 |
| 3.3.2. Máxima Entropía | 34 |
| 4. Cambio Climático | 35 |
| 4.1. Selección de escenario | 36 |
| 5. Metodología | 38 |
| 5.1. Descripción del área de estudio | 38 |
| 5.2. Obtención de los puntos de presencia para la especie | 39 |

| | |
|---|-----------|
| 5.3. Datos ambientales usados para la modelación..... | 39 |
| 5.3.1. Elección de variables ambientales para modelación | 39 |
| 5.4. Inferencia de nicho ecológico para <i>Canna indica</i> | 41 |
| 5.4.1. Distribución potencial..... | 41 |
| 5.4.2. Obtención de un modelo consenso..... | 42 |
| 5.4.3. Obtención de mapas de presencia de la especie y áreas de impacto del cambio climático | 42 |
| 5.4.3.1. Identificación de las zonas de impacto de cambio climático | 43 |
| 5.5. Áreas afectadas con el cambio climático..... | 44 |
| 5.5.1. Calculo de áreas afectadas con el cambio climático | 44 |
| 5.5.2. Calculo de la variación de las condiciones climáticas para achira en el 2020. | 45 |
| 6. Resultados..... | 46 |
| 6.1. Puntos de presencia para la evaluación de los modelos | 46 |
| 6.2. Valores de AUC y UMBRAL de presencia..... | 47 |
| 6.3. Distribución potencial a futuro | 47 |
| 6.4. Coeficiente de variación por modelo para las proyecciones a futuro | 48 |
| 6.5. Modelo consenso..... | 49 |
| 6.6. Impacto del Cambio Climático sobre la distribución potencial | 50 |
| 6.7. Variaciones climáticas de los modelos climáticos | 52 |
| 6.8. Potenciales nuevas áreas y pérdidas de área..... | 52 |
| 7. Discusión..... | 54 |
| 7.1. Condiciones iniciales | 54 |
| 7.2. Efectos del cambio climático..... | 57 |
| 8. Conclusiones..... | 59 |
| 9. Recomendaciones..... | 60 |
| Bibliografía | 61 |
| Anexos | 69 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Diagrama general de la taxonomía y variedades de la achira (Caicedo <i>et al</i> , 2003)..... | 22 |
| Figura 2. Rizomas de achira, A.) rizomas para plantar, B.)rizomas listos para rayar | 23 |
| Figura 3. Aspecto de la planta de achira..... | 25 |
| Figura 4. Aspecto de las hojas (Caicedo <i>et al</i> , 2003)..... | 25 |
| Figura 5. Fruto de achira (CORPOICA, 2001)..... | 25 |
| Figura 6. Regiones del mundo donde se desarrollan algunas especies de achira (Caicedo <i>et al</i> , 2003)..... | 26 |
| Figura 7. Diagrama de las dimensiones de nicho ecológico, el espacio accesible para la especie (M), las relaciones abióticas (A) en la figura representada como temperatura y precipitación y relaciones bióticas (B) como competencia o fisiología de la especie...30 | |
| Figura 8. Modelado de Nichos ecológicos y distribuciones geográficas (Townsend <i>et al</i> , 2011)..... | 30 |
| Figura 9. Esquema de flujo de trabajo para la realización y validación de modelos de distribución de especies. (Felicísimo <i>et al</i> , 2005)..... | 32 |
| Figura 10. Principales características de las cuatro líneas evolutivas y familias de escenarios (IPCC, 2000)..... | 36 |
| Figura 11. Mapa político de Colombia (IGAC, 1999)..... | 38 |
| Figura 12. Interface de Maxent para la generación de la Distribución potencial..... | 41 |
| Figura 13. Generación de mapas consenso de actual y futuro usando DIVA-GIS..... | 42 |
| Figura 14. Vista del mapa de probabilidades de la especie y la reclasificación usada para convertirlo en un mapa de presencia-ausencia usando DIVA-GIS..... | 43 |
| Figura 15. Vista de la substracción de rasters para encontrar las áreas probablemente afectados por el cambio climático para el periodo 2020..... | 43 |

| | |
|---|----|
| Figura 16. Clasificación de valores para la identificación de áreas que puedan ser afectados por cambio climático, en el recuadro se observan los posibles valores obtenidos en la substracción de rasters..... | 44 |
| Figura 17. Cálculo de área actual de la especie usando el software R. v.3.0..... | 45 |
| Figura 18. Cálculo de área futura de la especie usando el software R. v.3.0..... | 45 |
| Figura 19. Departamentos y puntos de presencia y en donde se reporta <i>C. indica</i> usados para la modelación de nicho ecológico en Maxent..... | 47 |
| Figura 20. Distribuciones potenciales de <i>C. indica</i> proyectadas para el año 2020, A.) CSIRO_mk3_5 B.) UKMO_hadcm3 C.) CCMA_cgcm2..... | 48 |
| Figura 21. Rangos de Coeficientes de variación (CV) para cada modelo climático proyectado hacia el 2020..... | 49 |
| Figura 22. Mapa consenso de distribución potencial realizado en DIVA GIS A). Distribución potencial actual B.) Distribución potencial proyectada a futuro..... | 50 |
| Figura 23. Mapas de áreas afectadas por el cambio climático para cada uno de los modelos. A.) CSIRO_mk3_5 B.) UKMO_hadcm3 C.) CCMA_cgcm2 D.) Consenso..... | 51 |
| Figura 24. Cambios de la temperatura media anual (BI01) y precipitación media anual (BI012) con respecto a las condiciones presentes para cada GCM analizado..... | 53 |
| Figura 25. Porcentaje de nuevas áreas potenciales y pérdidas comparados con las áreas actuales | 54 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Composición y propiedades fisicoquímicas de los rizomas de la Achira..... | 23 |
| Tabla 2. Variables bioclimáticas y de elevación disponibles en World-Clim..... | 40 |
| Tabla 3. Variables climáticas empleadas en la modelación..... | 40 |
| Tabla 4. Áreas afectadas por el cambio climático..... | 45 |

INDICE DE ECUACIONES

| | |
|--|----|
| Ecuación 1: Forma general de la función de probabilidad, para i variables ambientales..... | 33 |
| Ecuación 2: Predicción del área potencial de distribución, para la entropía de $\hat{\pi}$ | 35 |
| Ecuación 3: Coeficiente de variación para identificación de incertidumbre..... | 42 |
| Ecuación 4: Cálculo de área ocupada actual..... | 44 |
| Ecuación 5: Cálculo de área ocupada proyectada..... | 44 |
| Ecuación 6: Variación de la temperatura..... | 46 |
| Ecuación 7: Porcentaje de cambio en la precipitación..... | 46 |

INDICE DE ANEXOS

| | |
|---|----|
| Anexo 1: Fuentes base para la obtención virtual de los puntos de presencia de la especie..... | 70 |
| Anexo 2: Mapas de desviación estándar de la distribución potencial actual. A.) CSIRO_mk3_5 B.) UKMO_hadcm3 C.) CCMA_cgcm2..... | 70 |
| Anexo 3: Mapas de desviación estándar de la distribución potencial proyectada a futuro. A.) CSIRO_mk3_5 B.) UKMO_hadcm3 C.) CCMA_cgcm2..... | 70 |
| Anexo 4: Comportamiento de las variables de temperatura (BIOCLIM) actual y futura..... | 71 |
| Anexo 5: Comportamiento de las variables de precipitación actual y futura..... | 71 |

GLOSARIO

Bagging: en estadística es la media de datos, agrupados en un paquete de atributos o metadatos.

Cambio climático: cambio del estado del clima observada durante largos periodos de tiempo.

Capas: son imágenes digitales que representan el comportamiento de variables geoespacialmente; en este documento representan variables climáticas.

Comisión: son errores en la modelación que consideran un espacio geográfico que en realidad la especie no ocupa o debería ocupar debido a la predicción de la presencia de la especie generalmente por analogía climática.

Distribución potencial: representación geográfica que simboliza el conjunto de localidades con condiciones climáticas similares a las existentes en aquellas en las que se tiene presencia, dicha representación se realiza mediante la modelización de la presencia y ausencia de especies sobre un territorio determinado.

Ecotipo: es una subpoblación genéticamente diferenciada que está restringida a un hábitat específico, un ambiente particular o un ecosistema definido, con unos límites de tolerancia a los factores ambientales.

Escenarios de emisiones: son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro respecto al cambio climático, las repercusiones futuras y opciones para mitigar el impacto.

Hábitat: Se refiere al conjunto de condiciones aptas y necesarias para que una especie se desarrolle y sobreviva. Es decir es el espacio físico en el cual se ha de desarrollar determinada especie.

Modelo de circulación global: son algoritmos matemáticos que intentan simular las condiciones de la atmósfera y océanos de la tierra, utilizados para pronosticar el tiempo, comprender el clima y proyectar el cambio climático.

Nicho ecológico: es el modo en que un organismo se relaciona con los factores bióticos y abióticos de su ambiente. Incluye las condiciones físicas, químicas y biológicas que una especie necesita para vivir y reproducirse en un ecosistema. La temperatura, la humedad y la luz son algunos de los factores físicos y químicos que determinan el nicho de una especie.

Omisión: son errores en la modelación, que no consideran el espacio que la especie debería estar ocupando, es decir que las áreas donde la especie se encuentra, se predice la ausencia de esta.

Proyección: simulación de diferentes sistemas (climáticos, edafológicos, hidrológicos, productivos, etc.) en un periodo de tiempo determinado.

Raster: es una cuadrícula en la que cada celda contiene un valor que representa información, como la temperatura, además son fotografías aéreas digitales, imágenes de satélite, imágenes digitales e incluso mapas escaneados.

Random Forest: es una técnica de clasificación estadística donde se usa combinación de árboles predictores tal que cada árbol de datos depende de los valores de un vector aleatorio probado independientemente y con la misma distribución para cada uno de estos. Es una modificación sustancial de bagging que construye una larga colección de árboles no correlacionados y luego los promedia.

Reclasificación: Técnica utilizada para convertir un mapa de probabilidades en uno binario (presencia-ausencia).

Resiliencia: Es la capacidad de regresión al estado inicial de una situación u objeto, como por ejemplo un resorte que luego de ser sometido a una fuerza de tensión, regresa a su estado inicial. También puede verse como la capacidad de enfrentarse a situaciones extremas sin afectar sus características y funcionalidad.

Restricciones: Son aquellas determinaciones de lo que se conoce impuestas por los valores de las variables ambientales en las localidades conocidas de la especie, es decir que el valor esperado de cada distribución de probabilidad debe coincidir con los promedios empíricos de las variables ambientales.

Suberizado: es un término utilizado para indicar el contenido de suberina o biopolímero natural, producido por las paredes celulares de algunas células de las plantas actuando como barrera entre la planta y el ambiente.

Taxón: grupo de organismos emparentados, que en una clasificación dada han sido agrupados, asignándole al grupo un nombre en latín, una descripción, y un "tipo", de forma que el taxón de una especie es un espécimen o ejemplar concreto.

Umbral: Criterio estadístico utilizado para definir la presencia-ausencia de una especie en un modelo de nicho ecológico.

ABREVIATURAS Y ACRONIMOS

AUC: Área bajo la Curva

°C: Grados centígrados

C.C.: Cambio Climático

CO₂: Dióxido de carbono

CORPOICA: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

CV: Coeficiente de Variación

ENM: Modelación de Nicho Ecológico

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

Fig.: Figura

GAMs: Modelos Aditivos Generalizados

GARP: Algoritmo Genético para el conjunto de reglas de predicción

GBIF: Infraestructura Mundial de Información en Biodiversidad

GCM: Modelo de Circulación Global

GLM: Modelos Lineales Generalizados

GEI: Gases de Efecto Invernadero

IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

IPT: Kit de herramientas de Integrated Publishing

Km²: Kilómetros cuadrados

MAXENT: Máxima entropía

MDP: Modelo de distribución Potencial

mm: milímetros

m.s.n.m.: Metros sobre el nivel del mar

NASA: Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio, por sus siglas en inglés (*National Aeronautics and Space Administration*), es la agencia del gobierno estadounidense responsable del programa espacial civil, además de la investigación aeronáutica y astronáutica en ese país.

NRC: Consejo Superior de Investigaciones Científicas

OMM: Organización Meteorológica Mundial

OMS: Organización Mundial de la Salud

OIT: Organización Internacional del Trabajo

PNUMA: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

ROC: Característica de funcionamiento del receptor

SIB: Sistema de Información sobre Biodiversidad de Colombia

RESUMEN

La achira (*Canna indica* L.) es una especie de importancia comercial que genera biomasa al momento de la cosecha y que contribuye al mejoramiento de los suelos, también es materia prima para la elaboración de compotas, almidones, bioetanol, entre otros, y es además una fuente importante en la economía en comunidades agrícolas, sin embargo, se desconoce la distribución potencial y la influencia de la variación climática a futuro sobre esta y el impacto sobre la seguridad alimentaria de las personas que sobreviven gracias a su cultivo, por tanto se buscó identificar el impacto del Cambio climático sobre la distribución potencial de la achira para el año 2020. Para esto se usaron 70 registros de presencia obtenidos de herbarios y GBIF, información bioclimática y el modelo de nicho Maxent, proyectando esta distribución a futuro usando tres modelos climáticos de la familia A2. Los resultados sugieren que la especie se extiende alrededor de 9 departamentos del sur, centro y occidente del país y que la especie podría perder zonas aptas para su sobrevivencia alrededor de la cordillera central, oriental y en la zona amazónica. También podría presentarse migración de la especie a zonas montañosas de mayor altitud, lo que podría estar explicado por aumento de entre 0.2 a 1.4 °C en temperatura y de 20 a 70 mm de precipitación en tan solo 6 años.

Palabras clave: *Canna indica*, Achira, cambio climático, modelación de nicho, distribución de especies.

ABSTRACT

The Achira (*Canna indica* L.) is an important commercial specie that generates biomass that contributes to improve soil quality, also is a raw material for making jams, starches, ethanol, etc., as well it has been an important source of economic for farms, however, the potential distribution and the influence of climate variation to future over it, and the impact over food security from people that survive of their crop, therefore the aim was identify the impact of climate change on the potential Achira's distribution. For this purpose I used 70 records obtained from herbarium and GBIF, bioclimatic layers and using the niche model named Maxent, projecting this potential distribution to 2020 period using three general climate models from A2 Scenario. The results suggest that the specie extends about 9 departments of south, center and western Colombia and it could be lost suitable areas around the central and western ranges, else Amazon region, also would be migration to high mountainous areas, and this one would be explained by an increase from 0.2 to 1.4 °C in temperature and 20 to 70 mm of rainfall in just 6 years.

Keywords: *Canna indica*, Achira, climate change, modeling niche, species distribution models.

1. Introducción

El "cambio climático" es un cambio del estado del clima que puede ser identificado por los cambios en el promedio y/o la variabilidad de sus propiedades y que persiste durante un período prolongado, como décadas o más (Solomon *et al*, 2007.); así mismo la Convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés) (2013.), estableció a este como el cambio que puede atribuirse 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 largos períodos de tiempo.

Para Colombia se prevé un aumento promedio del 2.5% en la precipitación anual y 2.5 °C de la temperatura anual para el año 2050 (Lau *et al*, 2012). Sin adaptación acelerada, los efectos del cambio climático resultarían en la degradación del suelo y pérdida de materia orgánica, así como inundaciones en las zonas costeras, pérdidas de nichos en muchas especies vegetales y a su vez podría presentarse cambios en la prevalencia de plagas y enfermedades, descongelamiento de glaciares y estrés hídrico sobre todo para los departamento del Cesar y Huila (Lau *et al*, 2012).

Además de las pérdidas de suelo, las áreas actualmente cultivadas se verán impactadas, afectando al 80% de los cultivos generando consecuencias socioeconómicas significativas, pues el sector agropecuario es responsable del 40% de las exportaciones colombianas y el 21% de la población del país depende directamente de la agricultura como fuente de empleo (Lau *et al*, 2012); el cambio climático, por ende, tendría efectos de amplio alcance en la agroindustria, las cadenas de abastecimiento, nutrición y la seguridad alimentaria, lo cual ha convertido a este fenómeno en un tema de trascendencia a nivel mundial por el incremento en los precios de los productos agrícolas (cereales, lácteos, azúcar, aceite, entre otros) (FAO/RLC, 2010), quitando la posibilidad de acceso igualitario a suficientes alimentos inocuos y nutritivos para satisfacer las necesidades alimenticias (FAO, 2009).

En Colombia la Achira (*Canna indica* L.), es una especie herbácea que tiene en promedio 2.5 a 3 m de altura, que es cultivada con fines comerciales y tradicionalmente ha sido un cultivo de minifundio y de huerta familiar con extensiones promedias inferiores a una hectárea y es cosechada con el propósito de extraer el almidón de sus rizomas, el cual es utilizando en su gran mayoría como materia prima en la fabricación de bizcochos y de otros productos autóctonos de consumo local y regional (CORPOICA, 2001), así con base en lo anterior se puede establecer una importancia económica significativa de esta especie que por acciones del cambio climático, tendría una variación en las condiciones óptimas para su desarrollo, por tanto es indispensable evaluar las condiciones futuras para determinar si la distribución potencial de *C. indica* se conserva y cuáles serían los efectos que pudiese ejercer el cambio climático sobre su hábitat.

1.1. Planteamiento del problema

El cambio climático influye directamente sobre la provisión alimenticia haciendo necesario tomar medidas de evaluación y prevención que determinen la disponibilidad de hábitat de las especies, en especial si son cultivadas o de usos tradicionales como alimentos, medicinales, culturales o parientes silvestres de cultivo para posible introgresión de rasgos de interés dentro de los cultivos, con el fin de conocer y mejorar la adaptación de la agricultura a estos cambios, para ello se utilizan herramientas de modelación de nicho que permiten conocer la distribución potencial y los posibles cambios de hábitat tales como pérdidas o ganancia de áreas para cultivo y sobrevivencia de las especies, para con esta información posteriormente realizar pruebas en campo como seguimiento a especies, evaluación de las condiciones climáticas, colectas de material vegetal, condiciones edafológicas, entre otras, como medidas de adaptación y reducción de la vulnerabilidad al cambio climático.

Para Colombia la achira es una especie de importancia comercial que genera biomasa al momento de la cosecha, la cual contribuye a la fertilidad, estructura y textura de los suelos que genera oxígeno, captura de CO₂ y regula la evaporación del agua del suelo; con ella se pueden elaborar compotas, almidones de gran calidad, bioetanol, además de las tradicionales achiras huilenses, diversidad de productos gastronómicos (panes, bizcochuelos, rosquillas, etc.), artesanales (rosarios, collares, envoltorios, etc.), medicinales (cataplasmas, cocciones diuréticas, entre otros). La especie es una fuente importante en la economía de las poblaciones campesinas, pues es generador de empleo e incentiva el trabajo en equipo, actuando como estabilizador social pues incluye a familias completas, hombres y mujeres en la producción y elaboración de cada producto.

A pesar de que esta especie es bastante usada, hasta el momento no se conocen acciones para dilucidar los posibles efectos del cambio climático sobre las áreas disponibles para la supervivencia de la especie, así, dentro de éste contexto surgen inquietudes relacionadas acerca del futuro de la especie como: ¿Se ha de conservar su distribución geográfica?, ¿La tradición cultural prevalecerá sobre las implicaciones que trae consigo el cambio climático?, ¿La economía entorno a ella se verá afectada negativamente por los efectos del clima?; dada la importancia económica de una población que depende económicamente de ella y sus costumbres nativas, así como también la seguridad alimentaria que representa para las comunidades que hacen uso de esta especie, se pretende identificar el impacto del cambio climático para el 2020 sobre la distribución potencial de *C. indica*, mediante modelación de nicho ecológico de esta en el país, identificando la distribución potencial y los cambios sobre las áreas aptas para la supervivencia de achira, y con los mapas obtenidos, servir de guía para posteriormente dirigir trabajos de campo hacia sitios específicos donde la especie podría verse amenazada y obtener material vegetal o áreas nuevas donde podría establecerse la achira.

1.2. Objetivo general

Identificar los posibles efectos que pudiese ejercer el cambio climático sobre la distribución potencial de *Canna indica* L. en Colombia para el año 2020.

1.2.1. Objetivos específicos

- Inferir un mapa de la distribución potencial de *Canna indica* L. en Colombia.
- Identificar los cambios de hábitat de la especie para el escenario de emisiones A2.
- Identificar el área geográfica de impacto del cambio climático sobre la especie.

1.3. Esquema del documento

Este trabajo se organiza de la siguiente manera: en la sección 1 se presenta la parte introductoria de la investigación, mientras que en las secciones 2, 3 y 4 se presenta el marco teórico. En la sección 2 se desarrolla el origen de la especie en estudio comúnmente conocida como achira, se esquematiza la taxonomía y se describen las partes principales de esta especie como la raíz, tallo, sistema foliar e inflorescencia, además de establecer la importancia agrícola y socioeconómica que genera. En la sección 3 se presenta el concepto de modelos de distribución de especies, nicho ecológico, se establecen las pautas para la modelación de nicho, y finalmente se da una conceptualización del software Maxent que se utiliza en el estudio. En la sección 4 se desarrolla la situación actual que ejerce el cambio climático sobre el mundo y en especial sobre Colombia, a partir de lo cual se realiza la selección de la familia de escenario de emisión A2.

En la sección 5 se presenta la metodología en la cual se describe el área de estudio de desarrollo del proyecto, se suministra información pertinente al origen de obtención de los puntos de presencia de la especie y datos ambientales utilizados en la modelación, de acuerdo a las variables seleccionadas que permitieron realizar una inferencia de nicho ecológico para la achira (*Canna indica* L.) junto con la distribución potencial de cada modelo facilitando de esta manera la generación del modelo consenso, lo que aumenta los modelos empleados, cuyos resultados fueron visualizados y reclasificados, para así poder identificar las zonas de impacto de cambio climático y las áreas afectadas. En la sección 6 se presentan los puntos de presencia obtenidos para Colombia de manera gráfica, los valores de AUC y umbral, la distribución potencial proyectada a futuro, el modelo consenso y la gráfica de presencia-ausencia.

En la sección 7 se presenta la discusión de los resultados y por último en las secciones 8 y 9 se presentan las conclusiones y recomendaciones de este trabajo respectivamente.

2. Achira (*Canna indica* L.)

En esta sección se mostrará información entorno a la especie iniciando con el origen y/o procedencia (sección 2.1), seguido por la información taxonómica (sección 2.2) como identificación, seguido de las características físicas de la especie como los rizoma y tallos (sección 2.3), el sistema foliar (sección 2.4), inflorescencia (sección 2.5) y por último la importancia agrícola (sección 2.6) y socioeconómica (sección 2.7), todo esto con el fin de comprender más la Achira.

2.1. Origen

Las Cannáceas tienen tallos erguidos, simples y rizomas gruesos ricos en almidón. Los tallos miden entre 0.41 y 1.77 metros de altura, se reportan en estas plantas con tallos de 2.5 a 3.0 m. de altura, las cuales están cubiertas por vainas envolventes de las hojas, además poseen entrenudos cortos o largos según el cultivar de donde salen hojas de color verde o morado dependiendo del origen de la especie, y de cada una de estas de su extremo superior sale el racimo floral. Al hacer un corte transversal se puede observar los haces vasculares en los bordes y en el núcleo un tejido que llena el resto de su diámetro (Caicedo *et al*, 2003).

A pesar de encontrarse en el trópico, el origen de la achira ha sido muy discutido, por ejemplo Vavilov (1951), propuso que la achira se originó en algún lugar de los Andes centrales, así también Herrera (1942a,b) sugiere que las montañas del sur del Perú son el lugar más probable para la domesticación de la especie, mientras Cohen (1978) está a favor de la costa desértica norte de Perú Gade (1966), al igual que Sauer (1952) que opta por un origen más al norte, en el bosque lluvioso o las montañas de Colombia.

La primera mención de achira (Fig. 1) fue dada por el español Diego Palomino, un capitán del ejército de Pizarro (Cobo, 1890-1895). En una comunicación de 1549, él anota que la achira era una de las cuatro raíces cultivadas por los residentes del valle de Chuquimayo. Por otra parte Mateos (1956) se refiere a que Bernabé Cobo, en 1609, hace la primera descripción de achira, después de un viaje al Cusco y Seminario, J. (2004) dice que Ruíz y Pavón en *Florae Peruvianaes et Chilensis* señalan la confusión con *C. indica* L., una especie relacionada pero de crecimiento más bajo, que sostiene flores rojas más brillantes; así no fue sino hasta 1823 que fue reconocida como una especie distinta por Ker-Gawler, quien la llamó *Canna edulis*. Sin embargo, como no todos los botánicos sudamericanos conocían o estuvieron conscientes del trabajo sistemático de estos dos autores europeos, el nombre científico equivocado se siguió

usando por algún tiempo después. Hoy se acepta que *C. edulis* es sinónimo de *C. indica* L. (Brako y Zarucchi, 1993).

2.2. Taxonomía

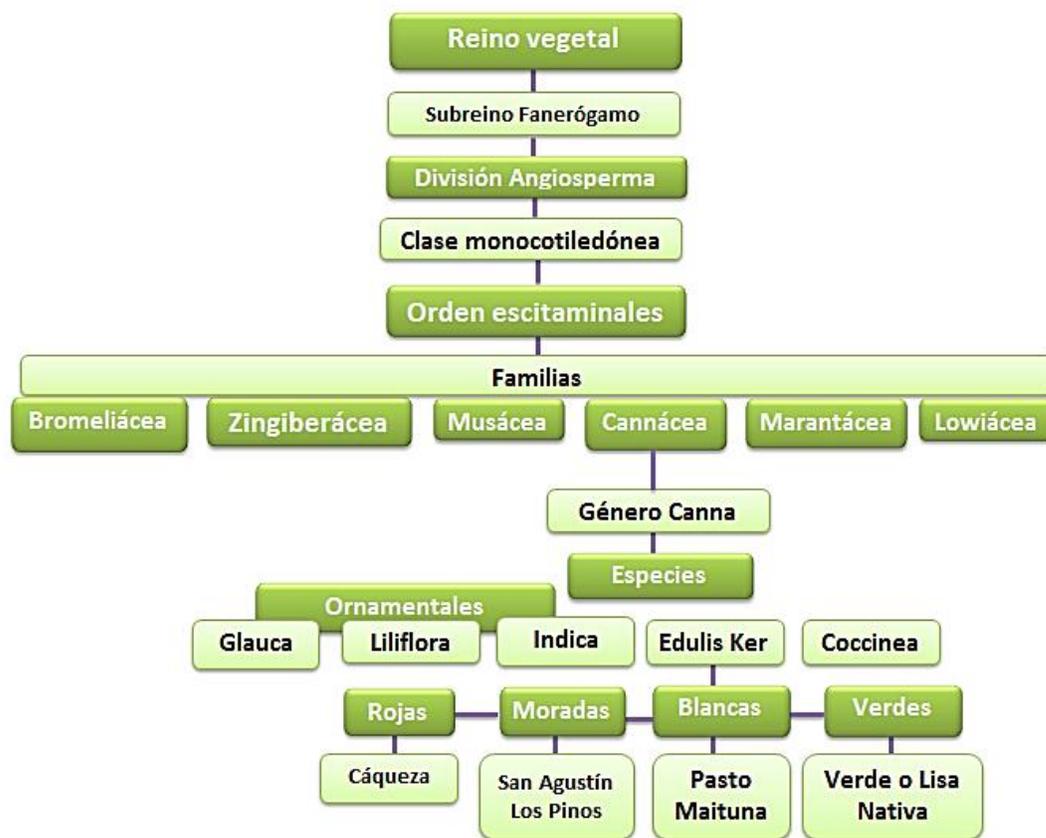


Fig. 1. Diagrama general de la taxonomía y variedades de la achira (Caicedo *et al*, 2003).

2.3. Raíz y tallo

Las raíces son pequeñas blancas y cilíndricas, originándose debajo sobre los segmentos del rizoma, los que dan origen a tallos aéreos que dependiendo de la variedad presenta más o menos cantidades de raíces (CORPOICA, 2001).

El sistema radical está conformado por raíces de características adventicias, fasciculadas, fibrosas, blancas y cilíndricas, que generalmente salen de la parte inferior del rizoma en forma irregular, su emergencia en la superficie del rizoma no se

ajusta a ningún patrón especial de distribución y lo hacen generalmente de manera individual o en grupos de raíces (Fig. 2) (Caicedo *et al*, 2003).

Estas raíces consideradas primarias dan origen a raíces laterales, secundarias y terciarias. Su color es blanco cremoso a pardo amarillento. Según la edad, son de consistencia frágil y flexible. Sus dimensiones están influenciadas por la textura y estructura del suelo, el diámetro y grosor está relacionado con el tamaño del rizoma. Se desarrollan en los primeros 10 a 20 centímetros del suelo, en forma lateral (Caicedo *et al*, 2003).

Los rizomas son abundantes, esféricos o en forma de trompo, con la base más ancha, miden de 15 cm de largo por 3 a 12 cm de ancho, en la superficie presentan surcos transversales que marcan la base de las escamas que lo cubren, además de la parte inferior salen raicillas blancas y cilíndricas, del ápice las hojas y el vástago floral (Caicedo *et al*, 2003). En el corte transversal, la estructura del rizoma se parece mucho a la del banano, la epidermis está constituida por tejidos fuertes, suberizados en las partes expuestas, frescos y suaves en las que aún están cubiertas por escamas (Caicedo *et al*, 2003) y la región cortical es angosta, más clara y compacta que el resto y pobre en almidón. El cilindro central es grisáceo, de parénquima abundante en almidón y azúcar y está recorrido por muchos haces vasculares que aparecen en tono más claro (León, J., 1968), además los brotes o yemas son producidos en las axilas de las escamas de los rizomas, algunas veces se encuentran en abundancia sobre los rizomas de tipo cilíndrico pero la mayor parte permanecen inactivos. Ordinariamente 3 brotes se desarrollan sobre los rizomas de tipo cónico, dos vigorosos brotes crecen sobre los rizomas de tipo oval y un número de brotes muy pequeños e inactivos, crecen en muy cortos nudos cerca del ápice del rizoma los cuales normalmente no se desarrollan y cuando algunos crecen es porque el rizoma es usado para semilla (León, J., 1968). (Tabla 1)

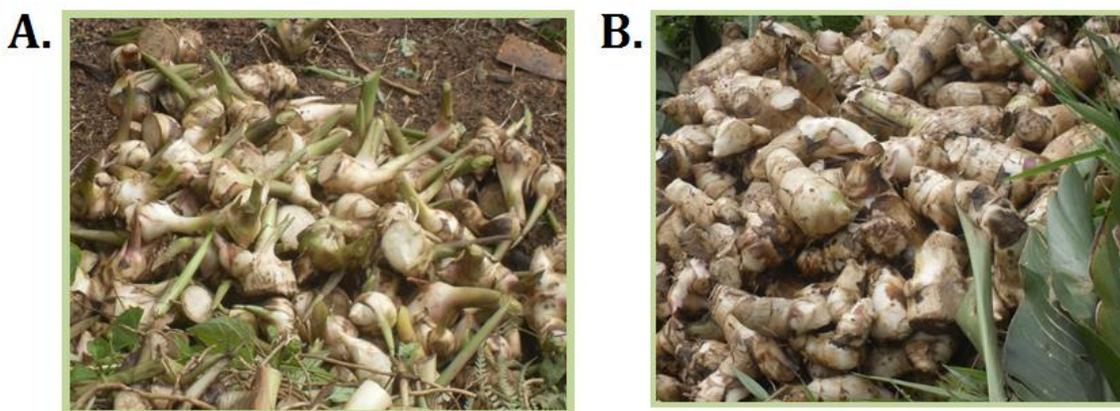


Fig. 2. Rizomas de achira, A.) rizomas para plantar, B.) rizomas listos para rayar

Tabla 1. Composición y propiedades fisicoquímicas de los rizomas de la Achira (extraído de (Caicedo *et al*, 2003)

| Composición/100g rizoma | Base Húmeda |
|-------------------------|-------------|
| Valor energético, cal | 130 |
| Humedad, % | 66.8 |
| Proteína, g | 0.9 |
| Grasa, g | 0.1 |
| Carbohidrato total, g | 31.3 |
| Fibra, g | 0.5 |
| Cenizas, g | 0.9 |
| Calcio, mg | 15.0 |
| Fósforo, mg | 63.0 |
| Hierro, mg | 1.4 |
| Riboflavina, mg | 0.01 |
| Niacina, mg | 0.4 |
| Tiamina, mg | 0.03 |
| Ácido Ascórbico, mg | 7.0 |

Por otra parte se describe el tallo como un rizoma subterráneo (Fig. 2) que se desarrolla en ramificaciones y da origen a vástagos aéreos que forman macollas y/o pie, es decir, una nueva planta de la cual crecerán flores, tallos y hojas. Además se pueden presentar rizomas primarios, secundarios, terciarios y hasta cuaternarios; en el cultivo de *C. indica* el tamaño de los rizomas en pleno desarrollo fluctúa entre 5 a 15 cm de largo y de 4 a 10 cm de ancho, mientras que en especies silvestres, los rizomas son más largos, con segmentos carnosos que semejan rizomas (CORPOICA, 2001).

2.4. Sistema Foliar

Las hojas son alternas, con peciolos envainados y amplexicales sin lígula, de color verde pálido con bordes oscuros según el cultivar, posee lámina entera, elíptica y ovado-elíptica con base redondeada decurrente y generalmente son oblongas-ovales, oblongas-elípticas (Caicedo *et al*, 2003), también las vainas son envolventes y cubren totalmente el tallo, que se desarrolla en la base del vástago (CORPOICA, 2001).

En cuanto al promedio en el ancho de las hojas es de 10 a 40 cm de ancho y una longitud entre 11 a 80 cm, pero los datos pueden ser variables dependiendo del ecotipo y región en que se hallen (Caicedo *et al* 2003; CORPOICA, 2001), (Fig. 3 y 4).



Fig. 3. Aspecto de la planta de achira



Fig. 4. Aspecto de las hojas (Caicedo *et al*, 2003)

2.5. Inflorescencia

La inflorescencia en espiga terminal, está dispuesta en racimos que salen del tallo, con panículas irregulares, perianto compuesto por tres sépalos libres, angostos y agudos y a veces coralinos; tres pétalos más o menos unidos parecidos a los sépalos, angostos y agudos, generalmente coloreados, más largos que los sépalos y alternadamente con ellos, uno más corto que los otros (Caicedo *et al*, 2003; CORPOICA, 2001).

Los estambres son estériles más o menos petaloides, además los estaminodios representan las partes más vistosas de la flor (Caicedo *et al*, 2003), las flores de *Canna indica* son de coloración rojo vivo, menos llamativas que las de los cultivos ornamentales que son amarillas, rosadas y combinadas (CORPOICA, 2001) y además poseen fruto en cápsula (Fig. 5) que contienen numerosas semillas.



Fig. 5. Fruto de achira (CORPOICA, 2001)

2.6. Importancia agrícola

En la actualidad se reportan algunos países de Europa, Norte y Sur América con las áreas cultivadas y que hacen uso ornamental de *Canna indica*; se puede observar en Francia, Italia, Inglaterra, Alemania, España, Estados Unidos, Perú, Chile, Argentina, donde embellecen jardines y avenidas, de manera conjunta.

La especie de achira para la extracción de almidón se desarrolla principalmente en las regiones tropicales y subtropicales de todo el mundo (Fig. 6). Se reportan cultivos en el continente asiático como en Vietnam, Tailandia e India; en países de Oceanía como en Australia y Polinesia; en África como en la República Democrática del Congo y en la América tropical se cultiva en Perú, Ecuador, Bolivia, Brasil, Venezuela y Colombia, y en algunos países de Centroamérica se relacionan especies originarias de esas regiones y cultivos en menor escala. (Caicedo *et al*, 2003)

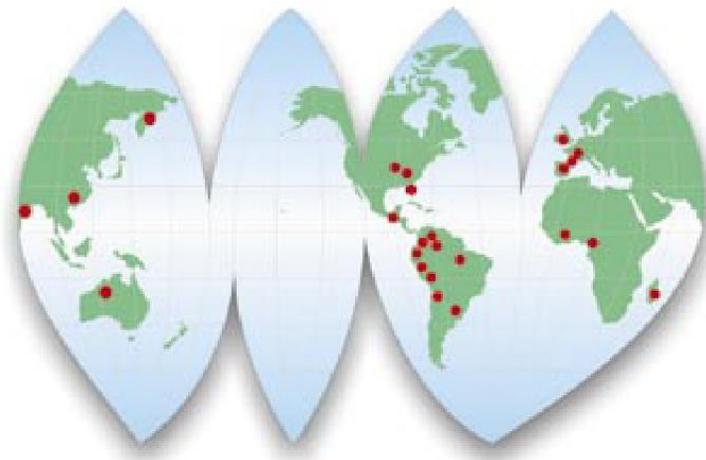


Fig. 6. Regiones del mundo donde se desarrollan algunas especies de achira (Caicedo *et al*, 2003)

En Colombia es un cultivo con fines comerciales presente en las regiones del oriente de Cundinamarca, Provincia de Ciénega, en los municipios de Guayabetal, Fosca, Gutiérrez, Quetame y Ciénega; en el departamento de Nariño en los municipios de La Cruz, San Pablo, La Unión y Mercaderes; en el departamento del Cauca en los municipios de Belarcázar y Toribío y en el departamento del Huila en los municipios de Isnos, San Agustín, Gigante, Tarqui, Altamira, Suaza, Pitalito, La Plata, Teruel, Iquirá, y Garzón. Hay cultivos o desarrollo de especies en menor escala y en estado silvestre en la Costa Atlántica, en límites con Venezuela, Norte de Santander (Pamplona), Valle del Cauca, Putumayo, Córdoba, Amazonas y Chocó (Caicedo *et al*, 2003).

Caicedo *et al*, (2003) indica que en la actualidad *C. indica* es una especie de importancia estratégica pues contribuye a la generación de empleo rural,

mejoramiento de la dieta alimenticia, oportunidades de generar valor agregado significativo, desarrollo sostenible de la agroindustria y que puede aportar al suelo un promedio de 21 ton/ha de biomasa al momento de la cosecha, contribuyendo a la fertilidad, estructura y textura del suelo, generando oxígeno, captura de CO₂ y regulando la evaporación del agua del suelo.

El nulo o escaso uso de insumos químicos en el cultivo, favorece la conservación de la biodiversidad ya que mantiene la posibilidad de producir una materia prima para la industria alimenticia sin contaminantes, contribuyendo a la salud humana (Caicedo *et al*, 2003).

A diferencia de lo ocurrido en los países andinos, en algunos países en otros continentes, su cultivo y uso industrial se ha incrementado en los últimos años, como ocurre en Vietnam que reporta la mayor área sembrada en el mundo con alrededor de 30.000 hectáreas, habiéndose generalizado su uso por las propiedades del almidón para la fabricación de pastas alimenticias contribuyendo así al beneficio económico de la población de ese país (Caicedo *et al*, 2003), también en otros países como en Tailandia, se evaluó a *C. indica* como una fuente alternativa de almidón, en comparación con la yuca, dando como resultado un almidón estable y de aumento de viscosidad al disminuir la temperatura, formando geles, con propiedades muy atractivas y totalmente diferentes al almidón de yuca la cual puede ser empleada de manera complementaria (Kuankonn *et al*, 2001). Por otra parte en China, Yuhong *et al* (2013) usando la achira como objeto de estudio encontró el efecto de las enzimas en la degradación de una pared celular y evaluó la viscosidad en el proceso de la fermentación durante la elaboración de bioetanol, dando como resultado que a partir de tubérculos como materia prima se puede utilizar el polisacárido de almidón y no almidón en la producción de bioetanol, y en Colombia Parra-Huertas, R. (2012) elaboró compota de gulupa y almidón de sagú endulzada con stevia como un producto agradable, que brinda ciertas características sensoriales tales como la buena aceptabilidad, sabor, aroma y apariencia, además de aprovechar la riqueza de producción agrícola local. Los resultados indicaron sensorialmente una buena aceptabilidad entre los panelistas, se destaca el sabor y aroma como intensos con un 40 y 65% respectivamente además de características fisicoquímicas propias de una compota, pH 3.5, acidez titulable 1.34%, humedad 81.8% y cenizas 0.39%.

Para el caso de Colombia, CORPOICA (2003) en su informe sobre el cultivo de la Achira indica que el almidón es utilizado en la elaboración de bizcochos y en la panificación, en la industria farmacéutica, en la industria textil, como espesante de jugos, gomas, como pegantes biológicos y acabados en papel.

2.7. Importancia socioeconómica

Actualmente la demanda en el país de achira es de 2.000 toneladas de almidón de achira al año, siendo el mayor consumidor el departamento del Huila, seguido por Tolima y Cundinamarca, y siendo principalmente usado para la agroindustria panificadora y microempresas artesanales que producen el famoso bizcocho de achira, que se ha constituido en un símbolo regional y que se ha posicionado en el mercado local y nacional, a su vez que se ha iniciado el proceso de exportación a Norteamérica, Centroamérica y países andinos donde muy seguramente por su calidad, se aceptará y contribuirá al incremento de la demanda (Caicedo *et al*, 2003).

Actualmente el cultivo de la achira vincula a 1169 productores, y ocupa a 3.500 personas en el cultivo y el beneficio de este, existen 362 microempresas vinculadas a la cadena productiva, generando 3401 empleos directos e indirectos en el Huila y el Tolima. La actividad en torno a la achira contribuye a la creación de tejido social por el relacionamiento cotidiano de los actores de la cadena, la demanda de mano de obra para el cultivo y el proceso, además, favorece el trabajo familiar y la asociación de productores, como estrategia para solucionar las necesidades tecnológicas y demanda de inversiones para el mejoramiento agroindustrial (Caicedo *et al*, 2003).

3. Modelos de distribución de especies

Los modelos de distribución de especies o en la bibliografía científica modelos de nicho (*Niche Models*), modelos de idoneidad (*Suitability Models*) o modelos predictivos del hábitat (*Predictive Habitat Distribution Models*) (Felicísimo *et al*, 2005), o simplemente modelos de distribución de especies (SDM o MDE), son representaciones cartográficas de la idoneidad de un espacio geográfico para la presencia de una especie en función de las variables empleadas para generar dicha representación. Esta idoneidad no es más que la relación matemática o estadística entre la distribución real conocida de la especie y un conjunto de variables independientes que se usan como indicadores de presencia. Estas variables suelen ser geológicas, topográficas o climáticas, y se espera que con algunas de ellas, individualmente o en combinación, puedan definir los factores ambientales que delimiten las condiciones favorables para la presencia de la especie (Guisan y Zimmermann, 2000), así un modelo de distribución de especies básicamente es una caracterización de las condiciones ambientales adecuadas para una especie, que ayuda a identificar donde están espacialmente ubicados los sitios que cumplen con los requisitos adecuados para las especies en estudio (Pearson, 2007).

3.1. Nicho ecológico

Quizás la definición más simple y más general del nicho ecológico se refiere a que es la "posición ecológica en el mundo" de un organismo (Vandermeer, 1972), así como se puede considerar como la "unidad última [la distribución], ocupada por una sola especie o subespecie" con factores físicos y climáticos que determinan o rigen la distribución geográfica potencial de esta, a diferencia de las relaciones con otras especies como la competencia o la depredación (Grinnell, 1917).

Otras definiciones consideran que es la posición o el estado de un organismo dentro de su comunidad y el ecosistema resultante de sus adaptaciones estructurales, así también como las respuestas fisiológicas y el comportamiento específico (por herencia y/o aprendizaje) (Odum, E. P., 1959), además de la relación del individuo o de la población en todos los aspectos de su entorno y por lo tanto el papel ecológico de las especies de la comunidad (Ricklefs, R.E., 1996) hacen del nicho ecológico la suma total de la utilización de los recursos bióticos y abióticos de un organismo en su ecosistema (Campbell, N.E., 1996), es decir, "modelos del hábitat potencial", afirmando que el concepto de hábitat puede ser aplicado a la descripción de la asociación entre los organismos y los factores ambientales (Kearney, 2006, Pulliam, 2000; Vetaas, 2002; Araújo y Guisan, 2006). Es decir son una combinación de condiciones ecológicas que la especie objeto puede tolerar (Grinnell, 1917; Peterson, 2006).

Así como el nicho ecológico considera múltiples dimensiones o variables, este en el caso de tenerse en cuenta las interacciones con otras especies se definirá como nicho efectivo (Hutchinson, 1957), mientras que si tiene en cuenta las variables y condiciones ambientales fundamentales y no interactivas importantes para conocer las condiciones geográficas y ecológicas de una especie, dentro de un contexto espacial amplio se denominará nicho Grinneliano (Soberón, 2007). Por último en caso de considerar las interacciones bióticas y las relaciones entre los recursos y las especies, variables que pueden ser medidas en una escala local, aplicará para la definición de nicho Eltoniano (Elton, 1927).

Aunque existen muchas definiciones de nicho, con base en las condiciones abióticas, bióticas y el espacio accesible para una especie el nicho ecológico presenta dos subdivisiones: Nicho fundamental y Nicho efectivo. El nicho fundamental de una especie consiste en el conjunto de todas las condiciones que permiten su supervivencia a largo plazo, mientras que el nicho realizado es el subconjunto del nicho fundamental que ocupa en realidad (Hutchinson, 1957), el cual puede ser más pequeño que el nicho fundamental debido a la influencia humana e interacciones bióticas como la competencia interespecífica, depredación, o las barreras geográficas que han obstaculizado la dispersión y colonización (Pulliam, 2000; Anderson *et al*, 2004), que es el espacio al que tienden a predecir los algoritmos de modelación.

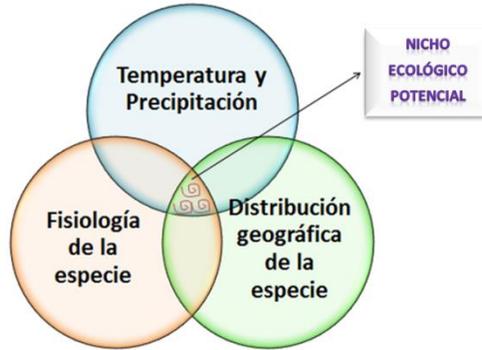


Fig. 7. Diagrama de las dimensiones de nicho ecológico (BAM), el espacio accesible para la especie como distribución geográfica (M), las relaciones abióticas (A) en la figura representada como temperatura y precipitación y relaciones bióticas (B) como competencia o fisiología de la especie.

3.2. Modelación de Nicho Ecológico

Los Nichos ecológicos pueden ser estimados a través de modelos, ya sean mecánicos, correlativos o la integración entre los dos (Buckley *et al*, 2010 y Booth *et al*, 2012). Los modelos mecánicos se basan directamente en las tolerancias fisiológicas (Kearney *et al*, 2009 y Buckley, L.B., 2013), sin embargo, estos modelos requieren experimentos laboriosos y a menudo costosos que los hacen poco atractivos de usar, por lo tanto para la inmensa mayoría de las especies, los métodos correlativos que aprovechan bastas fuentes de datos digitales con respecto a la ocurrencia de especies y las condiciones ambientales en todo el mundo representan una vía más factible para ser realizados (Soberón *et al*, 2004 y Newbold, T., 2010) (Fig. 8).

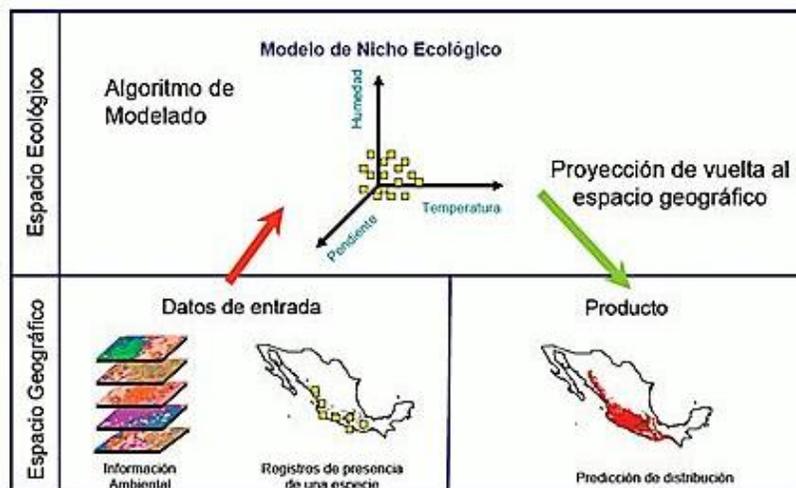


Fig. 8. Modelado de Nichos ecológicos y distribuciones geográficas (Townsend *et al*, 2011)

3.2.1. Construcción de Modelos de Distribución de especies

La construcción de modelos de distribución de especies se realiza en una serie de pasos organizados (Fig. 9), los cuales presentan múltiples alternativas de ejecución que influyen en la calidad del resultado final, similares a una receta de cocina, pues se usan algunos ingredientes denominados “variables climáticas” (Busby, 1986, 1991), y “puntos de presencia de la especie” (Zaniewski *et al*, 2002; Ottaviani *et al*, 2004; Olivier *et al*, 2006; Tsoar *et al*, 2007) que se mezclan o integran en un algoritmo que genera un producto final, en éste caso las zonas predichas de presencia de la especie.

En un primer paso, los datos conocidos sobre la distribución del organismo se asocian matemática o estadísticamente con diferentes variables que describen las condiciones ambientales útiles para que la especie sobreviva, posteriormente esta relación se extrapola al resto del área de estudio y se obtiene un valor en cada lugar que suele interpretarse como la probabilidad de presencia de la especie en ese punto, que indica la similitud ambiental de cada punto del terreno con las zonas de presencia actual de la especie. La “probabilidad de presencia” es por tanto, una interpretación de la medida de similitud ambiental que debería ser interpretada como un valor de idoneidad para el desarrollo de la especie, así, por ejemplo, es posible que el modelo delimite zonas potenciales muy alejadas geográficamente de las actuales y la probabilidad de hallar la especie sea baja, aunque potencialmente las condiciones ambientales sean favorables (Felicísimo *et al*, 2005).

En un segundo paso, la validación del modelo, hace necesario el uso de la estadística, en cuanto se usa la bondad de los modelos estadísticos para validar de diferentes formas nuestra información por métodos tales como el Área Bajo la Curva (AUC), índice Kappa, *True Skill Statistic*, y los análisis de sensibilidad y especificidad entre otros, aunque el AUC es el más usado para ENM (*Ecological Niche Modeling*), este varía en valores que pueden ir entre 0,5 a 1, con valores de 0,5 indicando que el modelo no tiene valor discriminante y valores cercanos a 1 indican que el modelo es fiable ya que si teóricamente se muestrean puntos donde la especie se ha predicho, se encontrarían efectivamente en estos, además se utilizan escalas de interpretación como límites no literales que dan una aproximación de la veracidad de cada modelo implementado (Phillips *et al*, 2006). Por ejemplo la sugerida por Araújo *et al* (2005) en la cual los modelos de nicho son Excelentes si $AUC > 0.90$; Buena si $0.80 > AUC < 0.90$; Aceptable si $0.70 > AUC < 0.80$; Mala si $0.60 > AUC < 0.70$; No válida si $0.50 > AUC < 0.60$.

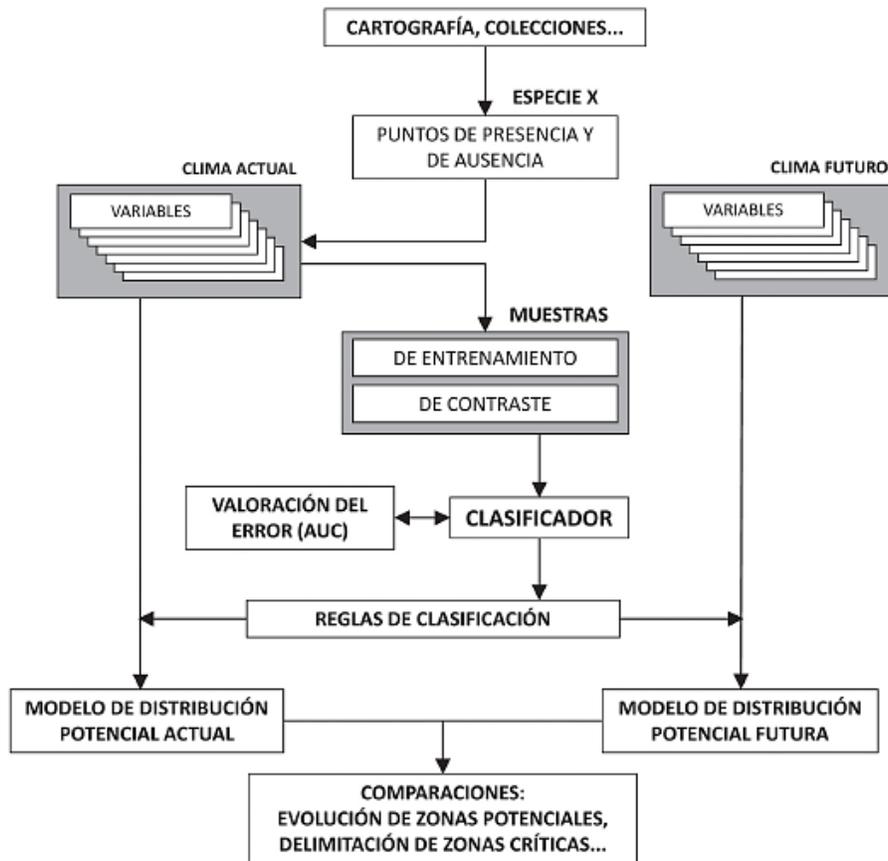


Fig. 9. Esquema de flujo de trabajo para la realización y validación de modelos de distribución de especies (Felicísimo *et al*, 2005).

3.3. Método Maxent

Maxent es el acrónimo de máxima entropía, un algoritmo que ha sido adaptado para la construcción de modelos de distribución potencial que fue desarrollado por Phillips *et al.*, (2004, 2006 y 2008). Los resultados que ofrece Maxent no sólo incluyen el Modelo de Distribución Potencial (MDP) sino que también incluye información que permite a los especialistas analizar las posibles relaciones funcionales en las que el modelo puede revelar entre la presencia del taxón y las variables predictoras usadas.

Entre los resultados obtenidos por Maxent están los gráficos y tablas de errores de omisión y la curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) con su AUC (Área Bajo la Curva); la importancia de cada variable en la construcción del modelo y un conjunto de curvas de respuestas de las variables frente a la probabilidad de presencia donde se muestran cómo varían la presencia del taxón ante los diversos valores que toma cada variable.

El algoritmo implementado en Maxent ajusta la probabilidad de la distribución de ocurrencia de una determinada especie para un conjunto de píxeles de la región de estudio basado en la idea de que la mejor explicación para el fenómeno desconocido es aquella que maximizará la entropía de la distribución de probabilidad (Phillips *et al*, 2006). Además presenta, entre otras ventajas, una base determinística y por eso tiene estabilidad estadística, así como habilidad para correr el modelo solamente a través de puntos de presencia de la especie a diferencia de otros algoritmos tales como GARP, BIOCLIM, entre otros que requieren mayor número de parámetros para su uso, además Maxent ha mostrado alto desempeño con pocos puntos de localización y mejor eficiencia en la operación con relación a Modelos Lineales Generalizados, Modelos Aditivos Generalizados (GLM y GAMs,, por su siglas en inglés respectivamente), y métodos de aprendizaje automático, como los enfoques bayesianos y redes neuronales, además que posee aún la ventaja de que la salida del modelo es continua, permitiendo la distinción entre los modelos generados para diferentes áreas (Phillips *et al*, 2006).

3.3.1. Fundamentos Matemáticos de Maxent

Los modelos construidos con Maxent, son de un algoritmo que ha sido adaptado para la construcción de modelos de distribución potencial (Phillips *et al*, 2004, 2006), y que se basa en las siguientes premisas:

1. La distribución de una especie se representa mediante una función de probabilidad **P** sobre un conjunto **x** de lugares en el área estudiada. **P** asigna un valor positivo a todo lugar **x** de forma que la suma de **P(x)** es la unidad. Posteriormente se construye un modelo de **P** mediante un conjunto de restricciones derivados de datos empíricos de presencia.
2. Las restricciones se expresan como funciones simples de variables ambientales conocidas, **f(v)**.
3. El método que usa Maxent obliga a que la media de cada función de cada variable esté próxima a la media real de la variable en las zonas de presencia; por ejemplo, la función correspondiente a la precipitación de enero debe generar una predicción de la misma cercana a la precipitación real observada.
4. De las posibles combinaciones de funciones de probabilidad y entropía, se utiliza la que minimiza la función de entropía medida con el índice de Shannon lo que, según los autores, permite realizar una selección óptima de variables y funciones en función de su significación y eliminar las que no aporta restricciones significativas al modelo.
5. La forma general de la función de probabilidad es, para **i** variables ambientales dado por la ecuación 1:

$$P(x) = e^{\lambda * f(x)} / Z_{\lambda} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde λ representa un vector de coeficientes de ponderación y \mathbf{f} el vector correspondiente de funciones. \mathbf{Z} es una constante de normalización que se utiliza para asegurar que $\mathbf{P}(\mathbf{x})$ es la unidad.

En Maxent, las funciones respecto a las variables pueden ser de tipo: lineales, cuadráticas e indicadores categóricos. La mayoría se usa para variables cuantitativas continuas como las usadas en este trabajo mientras que la última permite incluir variables nominales o categóricas.

Los autores destacan que los valores $\mathbf{P}(\mathbf{x})$ así obtenidos no tienen el significado estricto de probabilidad sino que deben interpretarse como valores de idoneidad relativa. Estos valores son normalmente transformados mediante una función logística que se ajusta a una escala más comprensible en el rango entre 0 (incompatible) y 1 (idóneo). Los valores son calculados para cada punto de la zona de estudio y "mapeados" de forma que se obtiene una representación cartográfica utilizable directamente en un sistema de información geográfica: el modelo de distribución potencial. Como este mapa presenta valores continuos entre 0 y 1 será útil para estadísticas y comparaciones estimar un valor de corte óptimo para separar dos clases únicas que muestran las estimaciones para zonas de presencia y de ausencia.

Los resultados de Maxent incluyen información sobre las dependencias entre variables y presencias en forma de gráficos y tablas que permiten analizar a los especialistas las posibles relaciones funcionales que el modelo puede potencialmente revelar.

3.3.2. Máxima Entropía

Maxent estima la probabilidad de distribución esperada, encontrando la probabilidad de distribución que es más uniforme (entropía máxima), dadas las restricciones de que el valor esperado de cada variable predicativa ambiental ajuste con su promedio empírico (valores para los datos de registros de presencia) (Phillips *et al*, 2006).

La entropía es el grado de evolución (orden) existente en un sistema. El principio de la entropía máxima afirma que, para todo sistema cerrado, la entropía siempre tiende a aumentar, es decir que todo sistema cerrado siempre tiende al desorden o a la incertidumbre estadística (Phillips *et al*, 2006).

Al aplicar Maxent para modelar la distribución de presencia de especies, los píxeles de la zona de estudio son el espacio en el que la distribución de probabilidades de Maxent está definida. Los píxeles con presencia de la especie registrada constituyen los puntos de muestra y las características son las variables climáticas (Phillips *et al*, 2006), así la distribución desconocida de la probabilidad, se denomina π y está definido sobre un rango \mathbf{X} (que corresponde a los píxeles del área considerada). Los elementos individuales de \mathbf{X} son considerados como puntos. La distribución de π

asigna una probabilidad $\pi(\mathbf{x})$, positiva, para cada punto \mathbf{x} . La suma (distribución desconocida) de estas probabilidades es de **1**. La aproximación de π es también una distribución de probabilidad, se escribe $\hat{\pi}$ (Phillips *et al*, 2006).

Para predecir el área potencial de distribución, la entropía de $\hat{\pi}$ está definida como se muestra en la ecuación 2:

$$H(\hat{\pi}) = -\sum_{\mathbf{x} \in X} \hat{\pi}(\mathbf{x}) \ln \hat{\pi}(\mathbf{x}) \quad \text{Ecuación 2}$$

4. Cambio Climático

El clima de la Tierra ha cambiado a lo largo de la historia. En los últimos 650.000 años, han habido siete ciclos de avance y retroceso glacial. Cambios que son atribuidos a pequeñas modificaciones en la órbita de la Tierra que varían la cantidad de energía solar que nuestro planeta recibe y la influencia de la actividad humana (IPCC, 2007).

En la segunda mitad del siglo XIX se demostró la naturaleza de aumento en la presencia de CO₂ y demás gases atrapados en la atmósfera gracias a la base científica de muchos instrumentos en órbita de la NASA tales como: aviones de alto alcance, satélites, globos, y redes terrestres. Además de los núcleos de hielo extraídos de Groenlandia, la Antártida y los glaciares de montaña tropicales que muestran que el clima de la Tierra responde a los cambios en la radiación solar, en la órbita de la Tierra, y en los niveles de gases de efecto invernadero (NRC, 2006).

El cuarto reporte del IPCC (2013) menciona que la productividad de cultivos de gran importancia, como maíz, arroz y trigo, bajaría en un 25% o más haciendo del ejercicio de agricultores más difícil ya que los precios de los alimentos para los consumidores urbanos serán mucho mayores, sin embargo el sector agropecuario tiene muchas oportunidades para adaptarse, pues el Ministerio de Agricultura, junto con actores del sector, están impulsando una agricultura climáticamente inteligente: baja en emisiones y más adaptable al clima; adaptando cultivos que serían claves para superar ciclos como los fenómenos de El Niño o La Niña y usando pronósticos agroclimáticos, que permitan a los productores anticipar el comportamiento climático en los siguientes meses y adaptar sus prácticas agrícolas para aprovecharlo y no sufrir por estos mediante prácticas más limpias se pueden producir alimentos con menos huella hídrica y menos huella de carbono.

Para Colombia, el IPCC principal organismo internacional para la evaluación del cambio climático, establecido por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en 1988, habla de proyecciones de aumentos de temperatura globales de 3 °C en este siglo. La hipótesis que plantea el IPCC radica en el descenso de la temperatura en 0.5 °C por cada 100 metros que se sube respondiendo aproximadamente a una diferencia de 600

metros verticales. Este planteamiento permite analizar, concluir y predeterminar el comportamiento de las variaciones climáticas en diferentes ciudades de Colombia, contribuyendo estos cambios a agudizar variaciones en las lluvias y amenazando diferencialmente a la población en el suministro de alimentos agua, energía y salud (IPCC, 2014).

4.1. Selección de escenario

Entre 1990 y 1992, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) creó varios escenarios de emisiones a largo plazo, profusamente para el análisis de un eventual cambio climático y de sus repercusiones a futuro, además de las opciones para mitigar este, posteriormente en 1996 el IPCC desarrolló un nuevo conjunto de escenarios (Fig. 10), basado en la premisa que las emisiones futuras de gases de efecto invernadero (GEI) son el producto de muy complejos sistemas dinámicos determinado por factores tales como el crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico o el cambio tecnológico. Su evolución futura es muy incierta. Por tanto los escenarios son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro, y son un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán las fuerzas determinantes en las emisiones futuras, y para evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis.

Los escenarios son de utilidad para los análisis de impacto del cambio climático, y en particular para la creación de modelos del clima para la evaluación de los impactos y para las iniciativas de adaptación y de mitigación aunque cabe la posibilidad de que en la realidad las emisiones evolucionen tal como se describe en alguno de estos escenarios es muy remota. (IPCC, 2000).

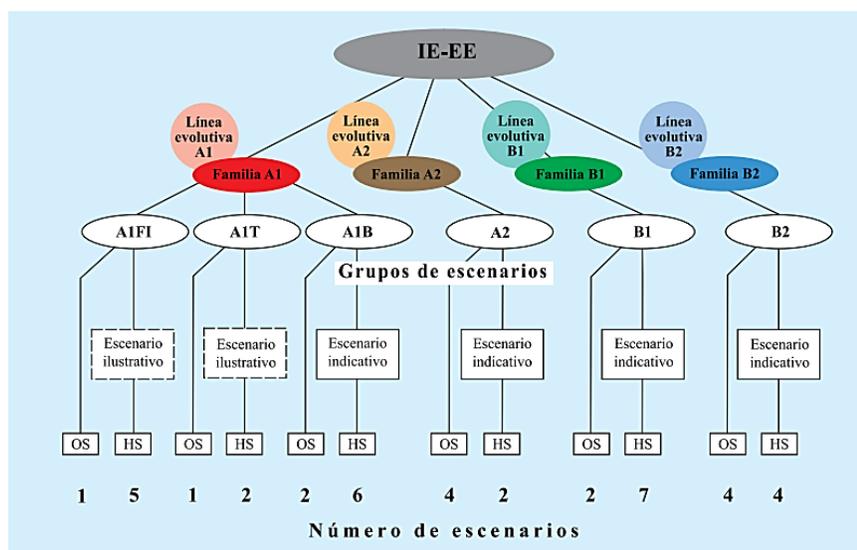


Fig. 10. Principales características de las cuatro líneas evolutivas y familias de escenarios (IPCC, 2000)

Dado el complejo panorama de posibles escenarios, el IPCC creó cuatro líneas evolutivas con cuatro familias de escenarios de emisiones llamados A1, A2, B1 y B2, que conforman un grupo de 6 de familias de escenarios (Fig. 10).

Así el IPCC (2000), describe la familia de líneas evolutivas y escenarios B2, como un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que a A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas B1 y A1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional.

En este caso de la familia B1, el IPCC (2000), describe un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza un máximo hacia mediados del siglo y que desciende posteriormente como en la línea evolutiva A1, pero con rápidos cambios de las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y de introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de recursos. En ella se da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y medioambiental, así como a una mayor igualdad pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.

La familia A1 por otra parte es descrita como un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo XXI y disminuye posteriormente, a su vez de una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante.

Por último el IPCC (2000), dentro de estas familias de escenarios describe la línea evolutiva y familia de escenarios A2 como un mundo heterogéneo. Sus características más distintivas, son la autosuficiencia y la conservación de identidades locales. Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante, así como el cambio tecnológico está más fragmentado y son más lentos en otras líneas evolutivas.

5.2. Obtención de los puntos de presencia para la especie

Para la obtención de datos de presencia de la especie, se realizó una búsqueda en la Base de datos del Sistema de Información sobre Biodiversidad de Colombia (SIB Colombia) (<http://www.sibcolombia.net/web/sib/home>), que es el nodo de GBIF en Colombia creado como una iniciativa del país para brindar acceso libre a información sobre la biodiversidad biológica de este, soportado por la herramienta IPT (*Integrated Publishing Toolkit*), cuya aplicación web de código abierto fue desarrollada por la Infraestructura Mundial de Información en Biodiversidad (GBIF) (<http://www.gbif.org/>), la cual ha sido personalizada por SIB Colombia para su uso público, además se realizó una consulta en el Herbario Surco de La Universidad Surcolombiana ubicado en la ciudad de Neiva (Huila), revisando la colección *C. indica*, tomando la información de las fichas y/o etiquetas de cada ejemplar existente teniendo en cuenta que los datos de presencia no eran completos en cuanto a datos de coordenadas, elevación y localidad específica, se realizó una georreferenciación haciendo uso de Google Earth versión 7.1.2.2041 para cada uno de los datos obtenidos usando la información de etiquetas de los ejemplares.

5.3. Datos ambientales usados para la modelación

5.3.1. Elección de variables ambientales para modelación

Para la modelación de la distribución potencial actual se usaron las capas climáticas de la base de datos WORLDCLIM (Hijmans, *et al*, 2006), disponibles en <http://www.worldclim.org/current>, con resolución 2.5 Arc-minutos, es decir a un tamaño de 5 km² por cada celda; estas corresponden a temperatura, precipitación y elevación (Tabla 2), además de la simulación de estas variables en tres modelos de circulación global (GCM) de la familia de escenarios A2 (CSIRO_mk3_5, UKMO_hadcm3 y CCMA_cgcm2) para la proyección de la distribución potencial al periodo 2020. Se usó este escenario ya que es el escenario más realista climáticamente, pues no incluye adaptación y describe un mundo más poblado sin nuevas tecnologías para mitigar. Estas fueron realizadas con base en el cuarto reporte especial de emisiones (SRES) del IPCC (2007), estos GCM son considerados como los más empleados para estudios de impacto climático en cultivos y distribución de especies y fueron obtenidos de la página web del programa CCAFS (Cambio Climático y Seguridad Alimenticia, por sus siglas en inglés, <http://www.ccafs-climate.org/data/>).

Tabla 2. Variables bioclimáticas y de elevación disponibles en World-Clim

| Variable | Descripción |
|------------------|--|
| Elevación | Altura en m.s.n.m. (metros sobre el nivel del mar) |
| BI01 | Temperatura Media Anual |
| BI02 | Rango medio diario (media del mes (Max Temp - Min Temp)) |
| BI03 | Isotermas ((BI02/BI07)*100) |
| BI04 | Estacionalidad de Temperatura (Desviación Estándar *100) |
| BI05 | Máxima temperatura del mes más caliente |
| BI06 | Mínima temperatura del mes más frío |
| BI07 | Rango anual de temperatura (BI05-BI06) |
| BI08 | Temperatura media del trimestre más húmedo |
| BI09 | Temperatura media del trimestre más seco |
| BI010 | Temperatura media del trimestre más cálido |
| BI011 | Temperatura media del trimestre más frío |
| BI012 | Precipitación anual |
| BI013 | Precipitación del mes más húmedo |
| BI014 | Precipitación del mes más seco |
| BI015 | Estacionalidad (Coeficiente de variación) |
| BI016 | Precipitación del trimestre más húmedo |
| BI017 | Precipitación del trimestre más seco |
| BI018 | Precipitación del trimestre más cálido |
| BI019 | Precipitación del trimestre más frío |

Para la elección de variables utilizadas en la modelación, se extrajeron los valores climáticos de cada coordenada obtenida correspondiente a los puntos de presencia de la especie, usando el software R v.3.0 y la librería Raster v.2.23.314, posteriormente se realizó un análisis de conglomerados (Cluster) mediante la librería ClustofVar usando la aproximación (PCAMIX), que usa un análisis de componentes principales para encontrar las agrupaciones de variables según su grado de correlación, seguidamente con este resultado, y con ayuda de literatura de Achira se escogieron 6 variables para la modelación de la especie en Maxent, tomando como criterio de selección la importancia biológica para reducir la incertidumbre en cada aglomeración tal y como lo recomiendan (Guisan y Zimmermann (2000); Hirzel y Lay (2008); Graham (2003); Muñoz y Felicísimo, (2004)(Tabla 3).

Tabla 3. Variables climáticas empleadas en la modelación

| Variable | Descripción |
|------------------|--|
| Elevación | Altura en m.s.n.m. (metros sobre el nivel del mar) |
| BI09 | Temperatura media del trimestre más seco |
| BI010 | Temperatura media del trimestre más cálido |
| BI011 | Temperatura media del trimestre más frío |
| BI017 | Precipitación del trimestre más seco |
| BI018 | Precipitación del trimestre más cálido |
| BI019 | Precipitación del trimestre más frío |

5.4. Inferencia de nicho ecológico para *Canna indica*

5.4.1. Distribución potencial

Para determinar la distribución potencial actual y proyectada a futuro se usó el software Maxent 3.3.3.k (Fig. 12), que usa el algoritmo Maxent que ajusta la probabilidad de la distribución de ocurrencia de la especie para el conjunto de píxeles de la región en estudio basado en la idea de que la mejor explicación para el fenómeno desconocido es aquella que maximizará la entropía de la distribución de probabilidad.

Para la modelación, se usaron los puntos georreferenciados y las capas ambientales escogidas previamente (Tabla 3), además de usar los tres modelos climáticos para la proyección para 2020, realizando 5 réplicas por cada modelo para generar un ensamble de los modelos reduciendo de ésta manera la incertidumbre asociada a cada mapa de probabilidades. La validación del modelo se realizó mediante una validación cruzada, utilizando el 75% de los datos de presencia para modelar y el 25% restante para evaluar, usando el AUC como prueba de predictibilidad de cada modelo, determinando modelos con AUC >0.7 como modelos fiables. Por último para generar mapas de presencia se usó como umbral de presencia para la salida logística de Maxent *la máxima suma de especificidad y especificidad de los datos de entrenamiento y evaluación*, de cada uno de los modelos.

Posteriormente los resultados se visualizaron en el software DIVA- GIS v.7.5.0.

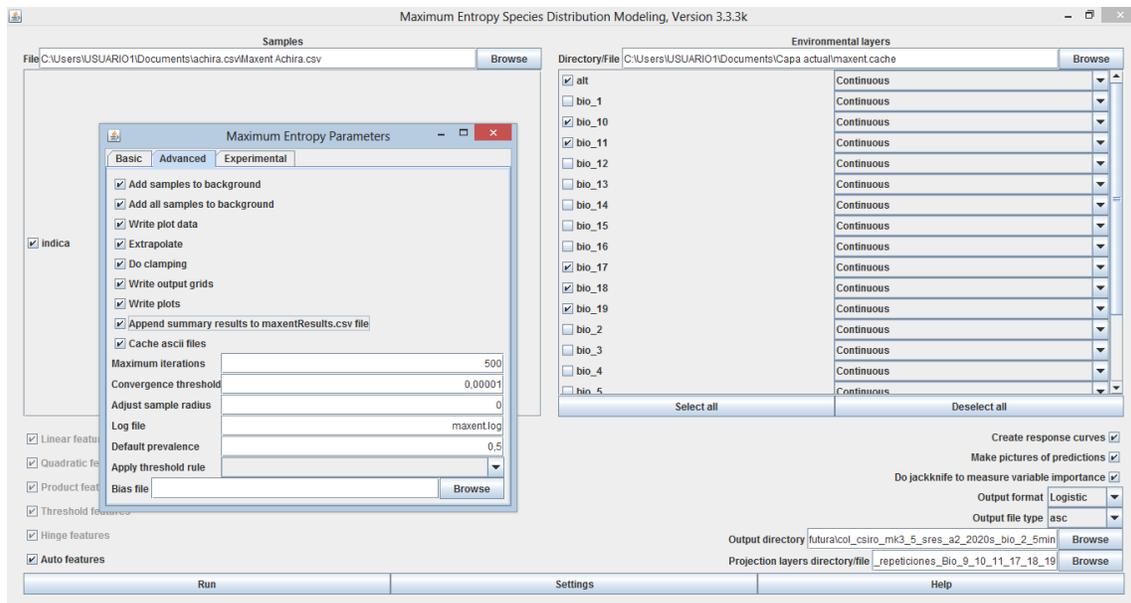


Fig. 12. Interface de Maxent para la generación de la Distribución potencial

5.4.2. Obtención de un modelo consenso

Se realizaron dos modelos consensos para futuro y presente en DIVA GIS versión 7.5.0 (Fig. 13) con la media de las réplicas realizadas para cada modelo de circulación global (GCM, por sus siglas en inglés) (CSIRO_mk3_5, UKMO_hadcm3 y CCMA_cgcm2) correspondiente al modelado a futuro y los datos modelados a presente, usando el software DIVA-GIS v.7.5.0 y R v.3.0, además se calcularon la desviación estándar y coeficiente de variación (Ecuación 3) para cada GCM y el modelo consenso para identificar la incertidumbre asociada a cada uno, mediante la librería Raster v.2.23.314.

$$\text{Coeficiente de variación (CV)} = (\sigma/\chi)*100 \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde σ representa la variación estándar y χ representa la media de los datos obtenidos a partir de los modelos.

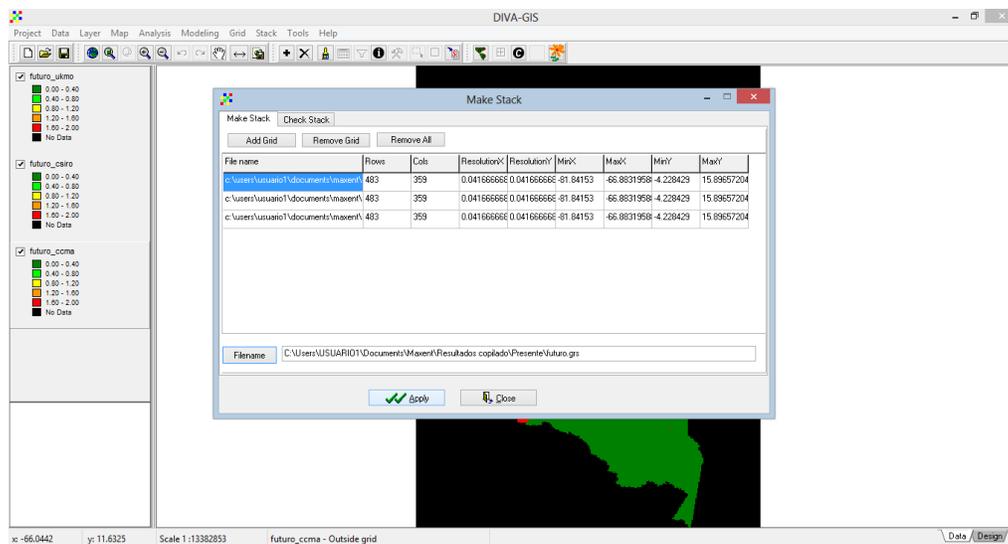


Fig. 13. Generación de mapas consenso de actual y futuro usando DIVA-GIS.

5.4.3. Obtención de mapas de presencia de la especie y áreas de impacto del cambio climático

Para obtener mapas de presencia y ausencia de la especie tanto para presente (Fig. 14) y futuro, se reclasificaron los mapas de probabilidades obtenidos en Maxent y los dos consensos (Fig. 15) a presente y futuro generados en DIVA-GIS, utilizando como umbral de presencia para los modelos a presente y futuro: *la máxima suma de sensibilidad y especificidad de los datos de entrenamiento* convirtiendo los valores de probabilidad menores al umbral a cero y mayores a este como uno para presente y dos para modelos proyectados a futuro para indicar ausencia y presencia respectivamente

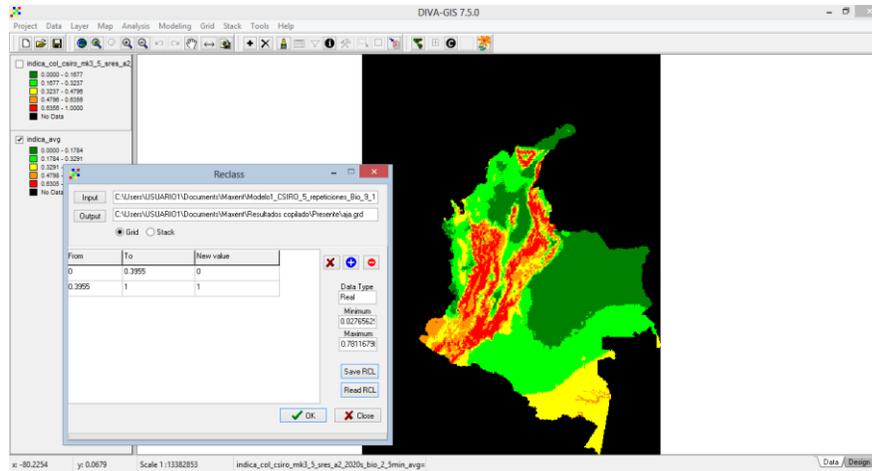


Fig. 14. Vista del mapa de probabilidades de la especie y la reclasificación usada para convertirlo en un mapa de presencia-ausencia usando DIVA-GIS.

5.4.3.1. Identificación de las zonas de impacto de cambio climático

Para identificar las áreas donde el cambio climático, pudiese ejercer algún efecto para cada modelo climático, se usaron las proyecciones a futuro y presente de cada GCM para realizar una substracción de rasters restando a la capa proyectada a futura la proyección a presente así poder obtener gráficamente las áreas donde el cambio climático pudiese ejercer algún efecto para el periodo estudiado (Fig. 16), ya que los posibles valores de las celdas del nuevo raster producto de la substracción tiene los siguientes valores: pérdida de área de la especie un valor designado de cero, posible pérdida de área con un valor designado de -1, presencia con un valor asignado de 1 y finalmente potenciales nuevas áreas se con un valor de 2.

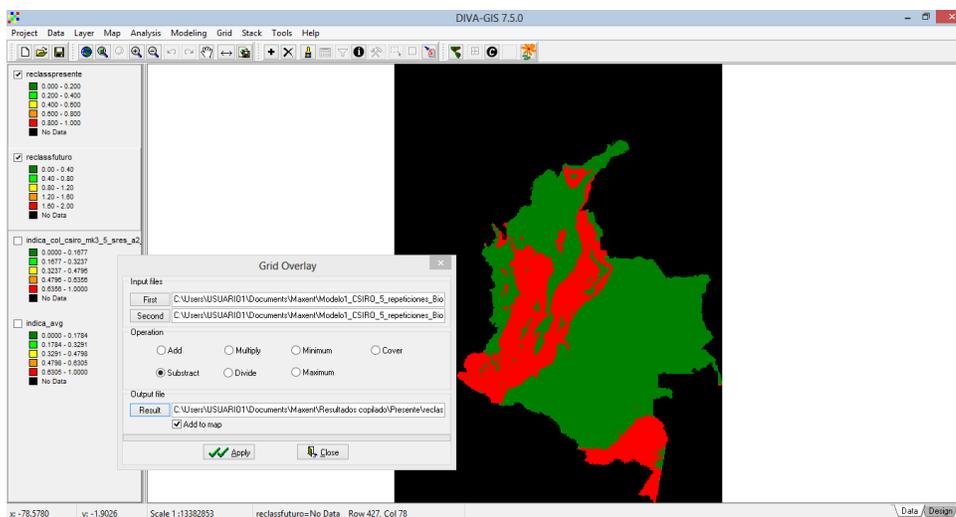


Fig. 15. Vista de la substracción de rasters para encontrar las áreas probablemente afectados por el cambio climático para el periodo 2020.

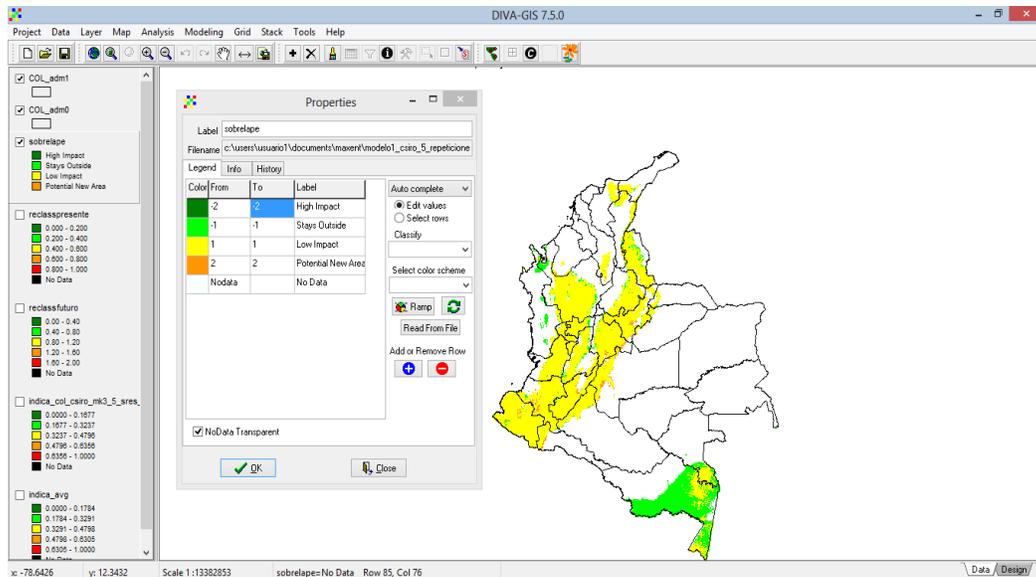


Fig. 16. Clasificación de valores para la identificación de áreas que puedan ser afectadas por cambio climático, en el recuadro se observan los posibles valores obtenidos en la substracción de rasters.

5.5. Áreas afectadas con el cambio climático

5.5.1. Calculo de áreas afectadas con el cambio climático

Para calcular las áreas donde la especie podría perder su hábitat se usó el software R v.3 y la librería Raster v.42.231., así el área ocupada de la especie para presente (Ecuación 4) y futuro (Ecuación 5) se calculó de la siguiente manera:

$$\text{Area ocupada actual: } \Sigma \text{ncell}(\text{presencia}) \times \text{resolución}(\text{Km}^2) \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\text{Area ocupada proyectada: } \Sigma \text{ncell}(\text{presencia}) / 2 \times \text{resolución}(\text{Km}^2) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde **ncell** representa la cantidad de celdas con valor de presencia y **resolución (Km²)**, representa el tamaño de la celda, la cual corresponde a un valor de 5 km² para este estudio.

Para el área ocupada por la especie a presente, se realizó la suma de las celdas con valor de presencia, la cual se multiplicó por la resolución y/o tamaño de celda (Fig. 17), obteniendo de esa manera el área total actual, posteriormente para determinar el área proyectada a futuro, se realizó la suma de las celdas con valor de presencia futura dividido por dos para evitar la duplicación de los valores de las celdas debido a ya que los valores de presencia a futuro tenían valor de dos para hallar las posibles áreas de afectación al cambio climático y finalmente se multiplicó por la resolución y/o tamaño de celda (Fig. 18).

```

RGui (64-bit)
File Edit View Misc Packages Windows Help

R Console

R is a collaborative project with many contributors.
Type 'contributors()' for more information and
'citation()' on how to cite R or R packages in publications.

Type 'demo()' for some demos, 'help()' for on-line help, or
'help.start()' for an HTML browser interface to help.
Type 'q()' to quit R.

[Previously saved workspace restored]

> library(rgdal)
Loading required package: sp
rgdal: version: 0.8-16, (SVN revision 498)
Geospatial Data Abstraction Library extensions to R successfully loaded
Loaded GDAL runtime: GDAL 1.10.1, released 2013/08/26
Path to GDAL shared files: C:/Users/USUARIO1/Documents/R/win-library/3.0/rgdal/$
GDAL does not use iconv for recoding strings.
Loaded PROJ.4 runtime: Rel. 4.8.0, 6 March 2012, [PJ_VERSION: 490]
Path to PROJ.4 shared files: C:/Users/USUARIO1/Documents/R/win-library/3.0/rgdal/$
> library(raster)
> r=raster("C:/Users/USUARIO1/Documents/Maxent/Resultados copilado/Presente/pre$")
> sum(r[which(r[]==1)])*5
[1] 79890
>

```

Fig. 17. Cálculo de área actual de la especie usando el software R. v.3.0

```

RGui (64-bit)
File Edit View Misc Packages Windows Help

R Console

'citation()' on how to cite R or R packages in publications.

Type 'demo()' for some demos, 'help()' for on-line help, or
'help.start()' for an HTML browser interface to help.
Type 'q()' to quit R.

[Previously saved workspace restored]

> library(rgdal)
Loading required package: sp
rgdal: version: 0.8-16, (SVN revision 498)
Geospatial Data Abstraction Library extensions to R successfully loaded
Loaded GDAL runtime: GDAL 1.10.1, released 2013/08/26
Path to GDAL shared files: C:/Users/USUARIO1/Documents/R/win-library/3.0/rgdal/$
GDAL does not use iconv for recoding strings.
Loaded PROJ.4 runtime: Rel. 4.8.0, 6 March 2012, [PJ_VERSION: 480]
Path to PROJ.4 shared files: C:/Users/USUARIO1/Documents/R/win-library/3.0/rgdal/$
> library(raster)
> r=raster("C:/Users/USUARIO1/Documents/Maxent/Resultados copilado/Futuro/futur$")
> sum(r[which(r[]==2)])*5
[1] 75215
>

```

Fig. 18. Cálculo de área futura de la especie usando el software R. v.3.0

5.5.2. Calculo de la variación de las condiciones climáticas para achira en el 2020.

Con base en los puntos de presencia observados se extrajeron los valores climáticos para el futuro y presente usando el software R v.3 y la librería Raster v.42.231, posteriormente el cálculo de la variación se representó el cambio en temperatura en °C y la precipitación en porcentaje de cambio con relación a la temperatura actual con base en las ecuaciones 6 y 7:

Variacion en la temperatura: $T_{\text{proyectada en el GCM}} / T_{\text{actual}}$ **Ecuación 6**

% de cambio de precipitacion: $\frac{(\text{Prec futuro GCM} - \text{Prec actual})}{\text{Prec actual}} \times 100$ **Ecuación 7**

En donde **T proyectada en el GCM** indica la temperatura proyectada para 2020 para cada GCM y **T actual** indica la temperatura actual, a su vez **Prec futuro GCM** y **Prec actual** indican la precipitación en un GCM proyectada para 2020 y **Prec actual** indica la precipitación actual, respectivamente.

6. Resultados

6.1. Puntos de presencia para la evaluación de los modelos

Se obtuvieron 70 puntos de presencia distribuidos entre Amazonas, Vaupés, Guaviare, Caquetá, Putumayo, Meta, Huila, Cauca, Valle del Cauca, Chocó, Cundinamarca, Casanare, Caldas, Antioquia, Santander y Magdalena, de los cuales, 13 fueron registros duplicados, es decir que se usaron con 57 puntos de presencia ya que el algoritmo utiliza sólo un punto de presencia por cada celda, eliminando puntos duplicados; de esos 57 puntos de presencia, 53 puntos (75%) se utilizó para modelación, y para la evaluación 17 puntos (25%)(Fig. 19).

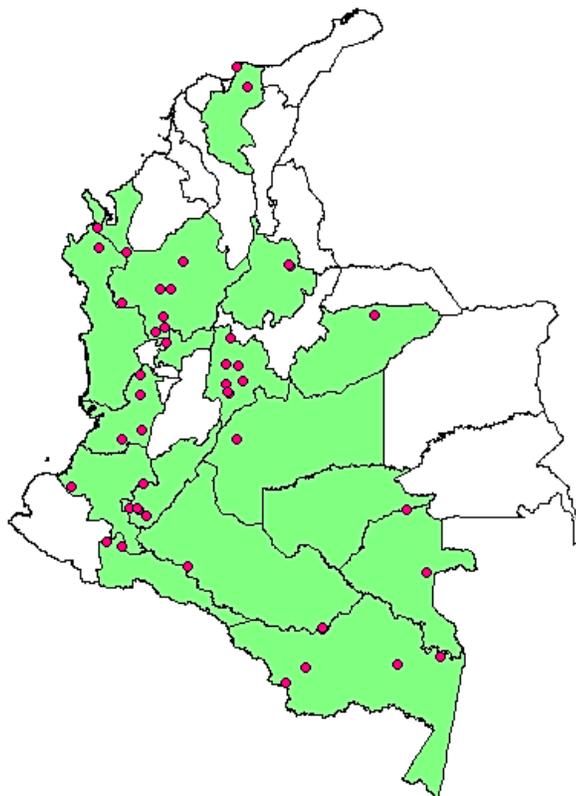


Fig. 19. Departamentos y puntos de presencia y en donde se reporta *C. indica* que fueron usados para la modelación de nicho ecológico en Maxent.

6.2. Valores de AUC y UMBRAL de presencia

En general para los tres modelos el valor del estadístico área bajo la curva (AUC) que permite la evaluación del modelo fue igual a 0.740 y el valor del umbral para la reclasificación fue de 0.3955, lo que indicó un buen desempeño de los modelos, de acuerdo a la interpretación recomendada por Araújo *et al* (2005), ya que los modelos generados son “buenos” cuando cumplen la condición si $0.80 > AUC < 0.90$.

6.3. Distribución potencial a futuro

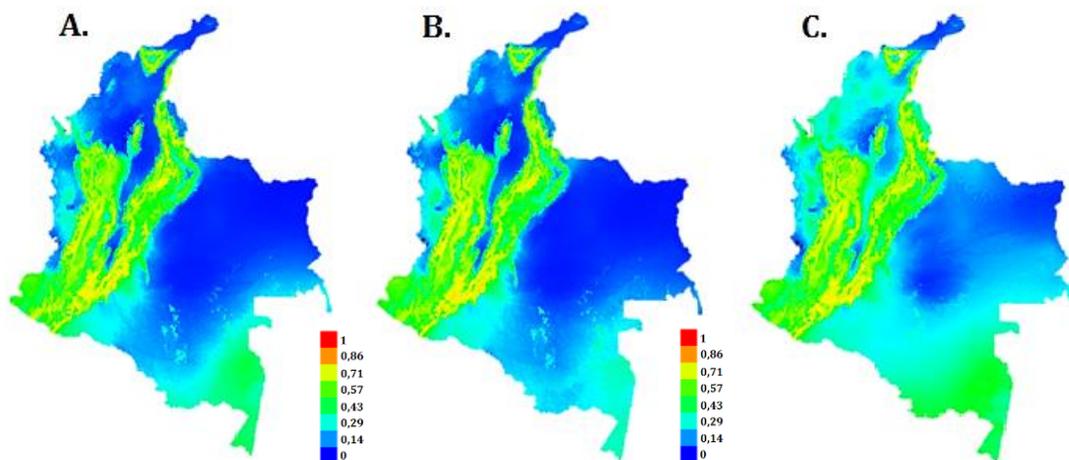


Fig. 20. Distribuciones potenciales de *C. indica* proyectadas para el año 2020, A.) CSIRO_mk3_5 B.) UKMO_hadcm3 C.) CCMA_cgcm2

Se puede apreciar que los tres modelos (Fig. 20) poseen diferencias notorias respecto a sus probabilidades de presencia de hábitat, en este caso las zonas con valores de 0 a 0.14 representan una muy baja probabilidad de presencia, es decir, indican las áreas con ausencia de la especie, además para cada modelo las áreas variaron debido al grado de incertidumbre, por tanto se aprecia que para CCMA_cgcm2 existe un notorio ajuste lo cual se presenta con un cubrimiento amplio de la totalidad del territorio basado en los pocos valores de 0 y 0.14 en el mapa (Fig. 20 C.), mientras que para los GCM UKMO_hadcm3 y CSIRO_mk3_5 se presentó una constitución similar, pues las diferencias entre si son pocas, sin embargo para el GCM CSIRO_mk3_5 se observó menor probabilidad de presencia comparado con los demás modelos.

Para los tres modelos de nicho (Fig. 20) para la región de la Orinoquia se presentaron los menores valores de probabilidad de ocurrencia de la especie. En el caso del GCM CSIRO_mk3_5, los departamentos que presentan menor probabilidad de presencia son: Guajira, Córdoba, Sucre, Bolívar, Magdalena, Arauca, Casanare, Vichada, Guainía, Meta, parte del Caquetá y Guaviare, mientras que para UKMO_hadcm3 las menores probabilidades de presencia se presentaron en: Magdalena, Córdoba, Guajira, Arauca,

Casanare, Vichada, Guainía, Meta, parte del Caquetá y Guaviare, finalmente para CCMA_cgcm2 la menor probabilidad de presencia se presentó en: Guajira, parte del Vichada, Guaviare y Meta. En conclusión se presentó una menor probabilidad de presencia para CSIRO_mk3_5 en 12 departamentos, de los cuales 10 de ellos coinciden con UKMO_hadcm3 y sólo 4 con CCMA_cgcm2, lo que da un promedio de probabilidad de presencia de la especie de aproximadamente el 28% respecto a la totalidad de la extensión territorial de Colombia.

6.4. Coefficiente de variación por modelo para las proyecciones a futuro

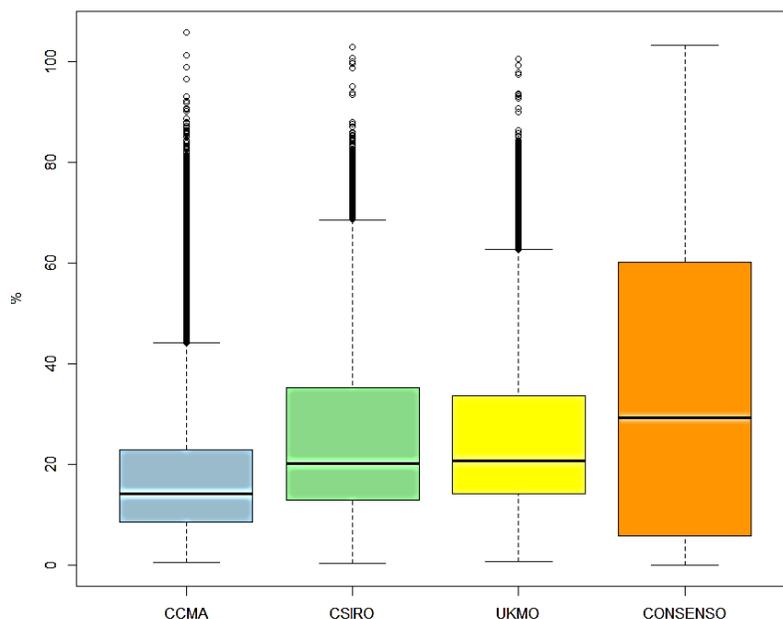


Fig. 21. Rangos de Coeficientes de variación (CV) para cada modelo climático proyectado hacia el 2020.

En cuanto a las medianas de los coeficientes de variación (Fig. 21) muestran un 29% para el modelo Consenso, 20% para los GCM CSIRO_mk3_5 y UKMO_hadcm3 y finalmente un 14% para el GCM CCMA_cgcm2, con base en ello se puede afirmar que el modelo que presenta menores valores extremos de variabilidad en cuanto a su construcción es el GCM CCMA_cgcm2, pero aunque los rangos de coeficiente de variación del modelo consenso hayan sido más altos comparados con los modelos restantes; los modelos climáticos usados muestran una mayor cantidad de datos que están por fuera del cuartil tres indicando una mayor variabilidad y valores extremos en las réplicas de cada proyección.

6.5. Modelo consenso

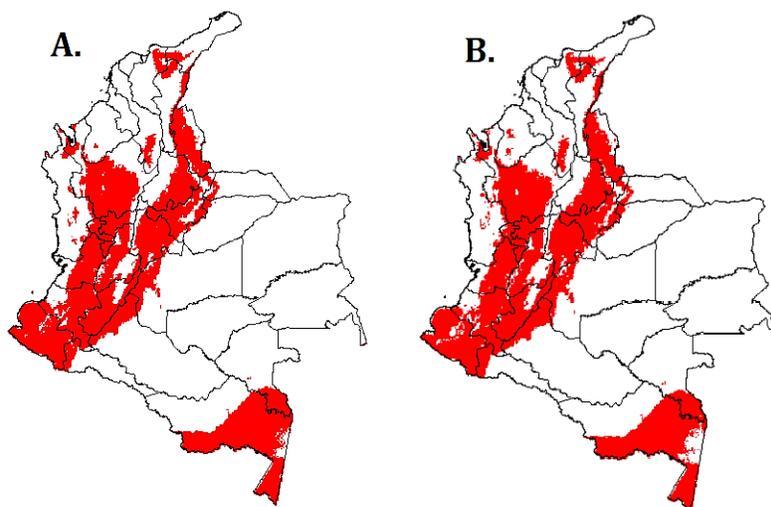


Fig. 22. Mapa consenso de distribución potencial realizado en DIVA GIS A.) Distribución potencial actual B.) Distribución potencial proyectada a futuro.

Para el modelo consenso de presencia y ausencia se puede observar que la distribución potencial a futuro podría aumentar el área de hábitat para la especie en comparación con la distribución potencial actual, mientras que en la región amazónica se podría presentar una reducción de hábitat a futuro.

El modelo consenso de la distribución potencial proyectada al 2020 (Fig. 22 A y B) presentaría una disminución del hábitat de la especie en los departamentos: Amazonas, Antioquia y Chocó, mientras que un aumento de área en los departamentos: Cauca, Córdoba y Cundinamarca, a su vez el modelo consenso muestra una pérdida de cobertura del 0.41% mientras que CSIRO_mk3_5 muestra 1.22%, UKMO_hadcm3 con 1.63% y finalmente CCMA_cgcm2 presentaría una presencia de 0.02%, del total de la extensión del país. Entre los modelos consenso y los GCM CSIRO_mk3_5 y UKMO_hadcm3, existe una diferencia de ausencia de área de 1%, mientras que el modelo consenso versus el GCM CCMA_cgcm2 mantiene una diferencia de 0.39%.

6.6. Impacto del Cambio Climático sobre la distribución potencial

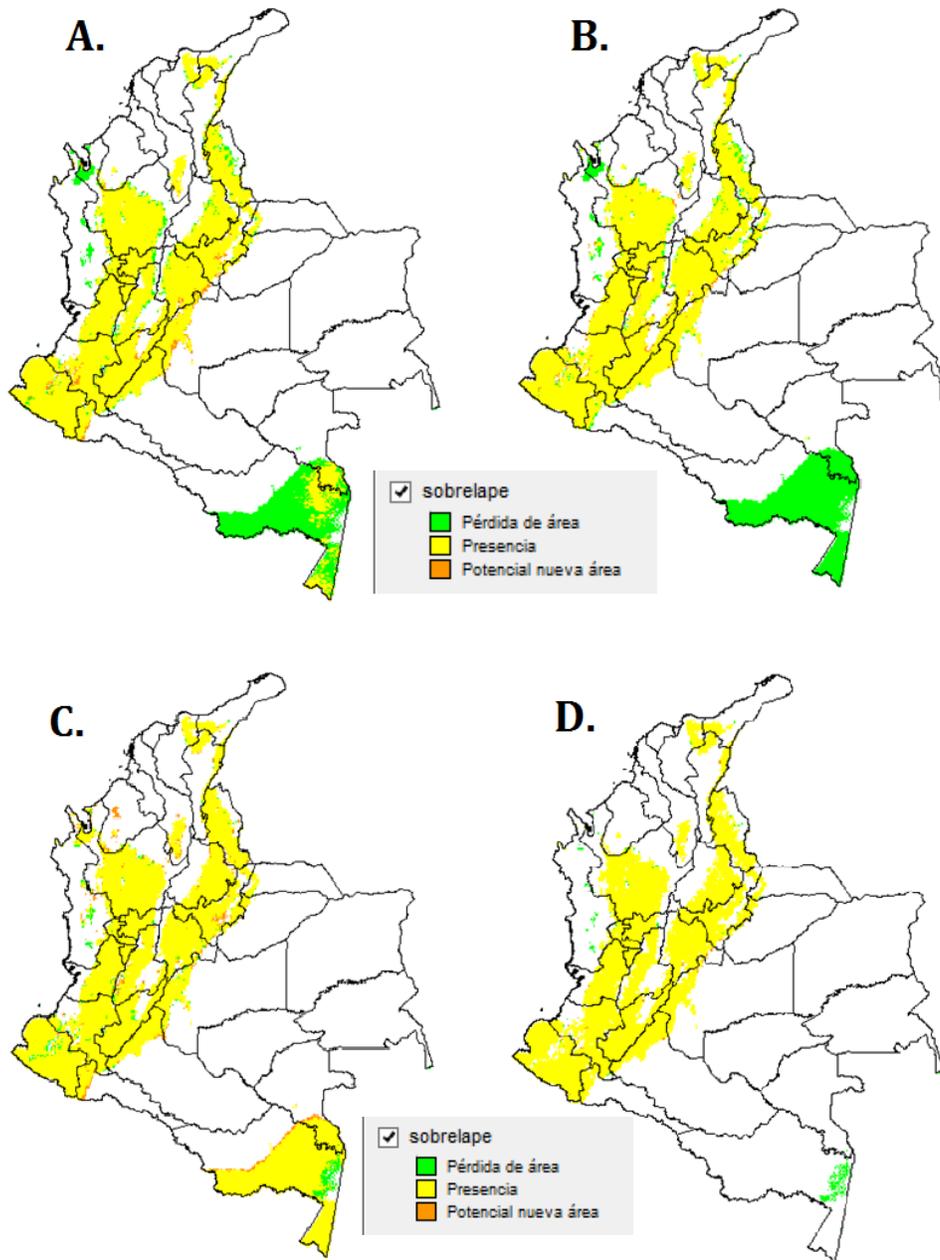


Fig. 23. Mapas de áreas afectadas por el cambio climático para cada uno de los modelos. A.) CSIRO_mk3_5 B.) UKMO_hadcm3 C.) CCMA_cgcm2 D.) Consenso

Con relación a los tres modelos climáticos usados y el modelo de nicho consenso (Fig. 23) se encontró para los modelos CSIRO_mk3_5 y UKMO_hadcm3 que existen mayores zonas con posible pérdida de hábitat ubicadas en la región Amazónica y parte del Caribe, lo que indica que la especie podría perder hábitat a corto plazo en estas zonas, en contraste usando el GCM CCMA_cgcm2 el hábitat muestra una tendencia a conservarse más que con el primer GCM. También se puede observar que para CSIRO_mk3_5 existen mayores posibilidades de aparición de nuevas áreas potenciales sobre las áreas montañosas, en especial la cordillera oriental.

Para el modelo GCM CSIRO_mk3_5 (Fig. 23 A) podrían existir nuevas áreas potenciales sobre las zonas de piedemonte de los departamentos del Meta, Cundinamarca, algunas zonas de Casanare, Boyacá, Antioquia, Córdoba, Atlántico, Cesar y la Guajira, mientras que las zonas con peligro de pérdida de área de alta incidencia estarían en los departamentos de Magdalena, Bolívar, Córdoba, Chocó, Amazonas y Vaupés. Por ultimo las zonas de presencia de la especie se presentan en su mayoría en los departamentos de Caquetá, Putumayo, Nariño, Huila, Cauca, Valle del Cauca, Quindío, Tolima, Meta, Cundinamarca, Caldas, Risaralda, Antioquia, Santander y Norte de Santander.

En cuanto al modelo de circulación global UKMO_hadcm3 (Fig. 23 B), se presentaría una distribución potencial mayor sobre las cordilleras hacia el periodo proyectado, con posibles nuevas áreas potenciales en los departamentos del Huila, Antioquia y Chocó, mientras que para Nariño, Cauca, Valle del Cauca, Huila, Cundinamarca, Tolima, Quindío, Caldas, Risaralda, Antioquia, Boyacá, Santander y Norte de Santander, se conservarían las zonas de presencia de la especie, adicionalmente existirían posibles pérdidas de áreas en los departamentos: Amazonas, Vaupés y parte de Antioquia para el año 2020.

Para la proyección realizada con el modelo CCMA_cgcm2 (Fig. 23 C) no se presentaría alto grado de impacto o pérdida de cobertura, es decir, no se presentaría pérdida de hábitat para la especie en la modelación, mientras que las áreas que podrían tener posibilidades de desaparecer se concentrarían en el departamento del Amazonas, así mismo existe la posibilidad de aparición de nuevas áreas en Boyacá, Córdoba, Amazonas y Vaupés.

Finalmente para el modelo consenso (Fig. 23 D), se evidenció presencia de la especie en Nariño, Cauca, Putumayo, Caquetá, Huila, Meta, Valle del cauca, Cundinamarca, Boyacá, Quindío, Risaralda, Caldas, Antioquia, Santander, Bolívar, Norte de Santander, Cesar, Magdalena y Guajira, y podrían existir nuevas áreas potenciales en el Huila, Cesar y Cundinamarca, así mismo en el Chocó y Amazonas se presentarían áreas de posible pérdida de hábitat.

6.7. Variaciones climáticas de los modelos climáticos

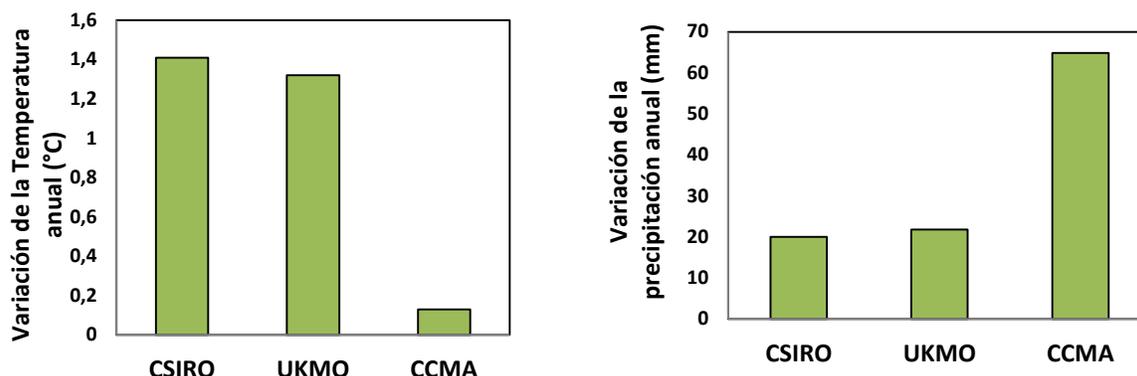


Fig. 24. Cambios de la temperatura media anual (BIO1) y precipitación media anual (BIO12) con respecto a las condiciones presentes para cada GCM analizado.

Para los mapas de áreas afectadas por el cambio climático se observan que las mayores variaciones de temperatura y disminución en la precipitación de cada GCM podrían explicar las pérdidas de área disponible a futuro, así para el GCM CCMA_cgcm2 se podría dar un aumento en las potenciales nuevas áreas podría ser debida a que la temperatura anual proyectada a 2020 aumentaría en 0.3 grados centígrados y la precipitación anual presentaría un incremento de 64.83 mm, que serían condiciones más favorables para la especie, mientras que para CSIRO_mk3_5 y UKMO_hadcm3 se presentaría un incremento de temperatura mayor a 1.2 grados centígrados y a 22 mm de precipitación anual comparado con las condiciones actuales, además podría haber una diferencia en la variación de la temperatura anual de 0.9 °C y de precipitación anual de 1.78 mm en comparación con CCMA_cgcm2 que tiene una diferencia promedio de 1.2 °C en temperatura anual y 43.89 mm de precipitación anual, proyección climática que en términos reales afectaría a la especie (Fig. 24).

6.8. Potenciales nuevas áreas y pérdidas de área

Tabla 4. Áreas afectadas por el cambio climático

| Modelos | Áreas (Km ²) | Área perdida y ganada (Km ²) |
|--------------|--------------------------|--|
| PresConsenso | 79.890 | -4.675 |
| FutuConsenso | 75.215 | |
| PresCSIRO | 79.890 | -13.905 |
| FutuCSIRO | 65.985 | |
| PresUKMO | 79.890 | -18.635 |
| FutuUKMO | 61.255 | |
| PresCCMA | 79.890 | 275 |
| FutuCCMA | 80.165 | |

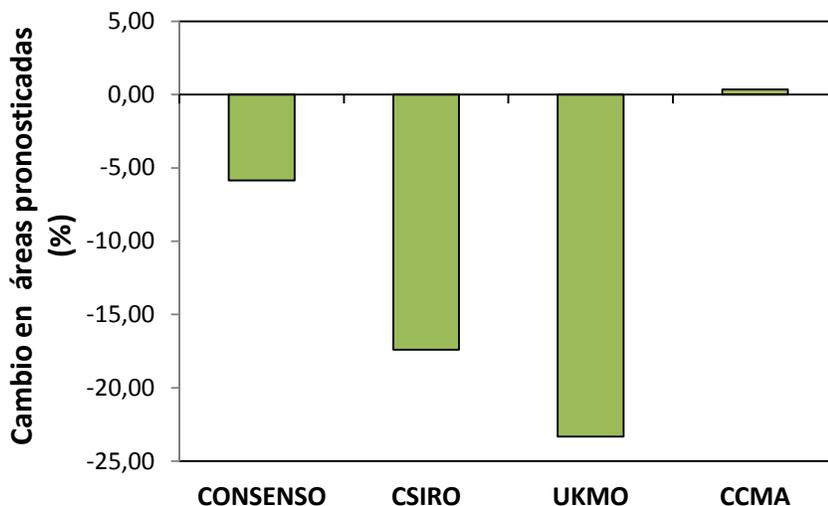


Fig. 25. Porcentaje de nuevas áreas potenciales y pérdidas comparados con las áreas actuales.

En cuanto a las pérdidas en hábitat, se presentaría una posible pérdida de área de hábitat para la especie de entre 13.905 Km² a 18.635 Km² para el 2020 para los GCM CSIRO_mk3_5 y UKMO_hadcm3 respectivamente, a su vez habría una posible ganancia de 275 Km² con el modelo CCMA_cgcm2 y una pérdida de 4.675 Km² para el modelo consenso, indicando que en el modelo CCMA_cgcm2 presenta condiciones más húmedas y de poco aumento en la temperatura. Además el modelo consenso indicaría aproximadamente un 0.41% de pérdida de hábitat de la especie en el territorio nacional, lo cual generaría un impacto negativo agrícola, social, económico y cultural para la sociedad en general pues esa pérdida implica una disminución en la producción de la especie y aumento significativo en el costo del almidón y demás productos derivados.

Las áreas de pérdida de hábitat fueron mayores que las potenciales nuevas áreas para dos de los tres GCM analizados (Tabla 4), en especial para el modelo de circulación global CCMA_cgcm2 que presentaría potenciales nuevas áreas para la sobrevivencia de la especie con un área de 275 Km², mientras que para CSIRO_mk3_5, UKMO_hadcm3 y el modelo de distribución consenso se presentaría un promedio de pérdida de hábitat de 12.405 Km², sin embargo el modelo de nicho consenso presenta una pérdida no mayor a 5.000 km² de área en el país (Fig. 25) y se evidenció que las áreas de pérdida no sobrepasarían los 80 mil kilómetros cuadrados, lo que corresponde aproximadamente al 7% de la totalidad del territorio colombiano.

7. Discusión

7.1. Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales son aquellas utilizadas como datos de entrada al software para que el algoritmo de Maxent genere un modelo de nicho ecológico. Los puntos de presencia usados fueron 70 en total, sin embargo 13 de ellos fueron registros duplicados que el algoritmo desechó en el momento de modelar, pues esto sólo toma un par de coordenadas únicas por cada celda que se van a evaluar en el área de estudio. De acuerdo con el mapeo se hallaron datos de presencia en Amazonas, Vaupés, Guaviare, Caquetá, Putumayo, Meta, Huila, Cauca, Valle del Cauca, Chocó, Cundinamarca, Casanare, Caldas, Antioquia, Santander y Magdalena de acuerdo a las bases de datos consultadas, también las capas utilizadas fueron variables climáticas de temperatura, precipitación y una covariable de elevación. Estas capas no representan una total acción antrópica ya que representan interpolaciones de datos climáticos para el periodo 2020, por tanto los resultados generados están sujetos a variaciones respecto a la proyección y las mediciones, pues las acciones del hombre influyen de manera indirecta o directa sobre las especies animales y vegetales, por tanto se requiere utilizar capas de uso y cambio de suelo, demografía humana y distancias a centros urbanos, entre otros, para refinar los modelos de distribución y obtener proyecciones más reales (Mateo *et al*, 2011).

A pesar de que la distribución potencial generada brinda una visión más amplia de la cobertura geográfica de la especie, es conveniente realizar una revisión de los posibles sitios donde está la especie para refinar los modelos y constatar la hipótesis de distribución potencial de achira aquí propuesta, es decir aplicar la modelación a los sitios donde es colectada la especie (Gamez, R., 2011), con el fin de tener información más específica de las condiciones aptas para *C. indica*, ya que debido a su complejidad, los sistemas naturales no permiten una adecuada modelación de la distribución geográfica de las especies (Anderson *et al.*, 2003; Pearson y Dawson, 2003), debido principalmente por su incapacidad para explicar las interacciones bióticas, los cambios evolutivos y capacidad de dispersión en especial en plantas, ocasionando que los errores en la predicción sean inevitables independientemente del método utilizado, así la distribución potencial de la especie, definida con la información actualmente disponible puede servir para determinar sitios importantes de concentración de especies (particularmente endémicas), y a su vez puede ser útil para estimar al diversidad de las áreas naturales protegidas (muchas de ellas sin un recuento de su riqueza florística) y así planificar o diseñar mejor un sistema de áreas naturales protegidas como lo afirman Peterson *et al.*, (2000) y Lindenmayer *et al.*, (1996) que discuten la utilidad de estos métodos como referencia para establecer las especies de estudio en los sitios que podrían ser adecuados como: plantaciones para la propagación de especies en peligro de extinción o de especial interés comercial. En particular, para los estudiosos de la diversidad vegetal colombiana, la información de

este tipo sería útil como fuente de información potencial para estudios taxonómicos y biogeográficos.

En cuanto a los modelos bioclimáticos es de notar que sufren errores de omisión (no consideran el espacio que la especie debería estar ocupando) y de comisión (consideran un espacio que en realidad la especie no ocupa o no debe ocupar) (Peterson y Vieglais, 2001; Anderson *et al.*, 2003). Todos los algoritmos usados para modelar la distribución potencial, involucran al menos una combinación específica de ambos tipos de errores. No obstante, la importancia de los modelos bioclimáticos no deben subestimarse ya que proporcionan un punto de partida útil para predecir la distribución potencial, tanto para distintos grupos biológicos como a distintas escalas geográficas (Peterson y Vieglais, 2001), y algunos autores subrayan la necesidad de contar con más y mejor información para un modelado eficiente de la distribución potencial de las especies como Lindenmayer *et al.*, (1996) y Peterson *et al.*, (2000) que sugieren el uso de un mínimo de 50 localidades con sus coordenadas geográficas bien determinadas para efectuar un análisis como el que realizado aquí.

A pesar de que los datos de presencia de la especie fueron obtenidos a partir de bases de datos especializadas (Bisby, 2000, Soberón y Peterson, 2004; Guralnick *et al.*, 2007) que son aptas para su uso académico, para la investigación no se tuvo en cuenta una estrategia para conseguir una homogeneidad de recolección de datos, es decir los puntos de presencia fueron colectados para diferentes fines y sin una estrategia común de muestreo (Reddy y Dávalos, 2003; Soberón y Peterson, 2004; Hopkins, 2007; Papes y Gaubert, 2007; Schuman *et al.*, 2007), además algunos puntos fueron georreferenciados mediante Google Earth, pues existió ausencia de coordenadas, debido a que en los datos de colecta solo se suministraba información de localización referente a veredas, ríos, cercanías, pueblos, entre otros. Adicionalmente todos los puntos de presencia se convirtieron a coordenadas métricas, para facilitar el ingreso de datos en Maxent, hecho que pudo reducir la precisión de la georreferenciación ya que esta puede poseer un error de distancia de al menos 10 Km y eso podría haberse evidenciado en el mapa de ocurrencia o de puntos de presencia de la especie que no representa la totalidad de áreas aptas para achira, caso particular en el departamento del Huila, el cual no cuenta con una cultura de colecta de datos adecuada y por tanto se pudieron haber omitido muchos puntos de presencia que podrían contribuir a un mejor resultado en la proyección de la distribución potencial, pues entre más puntos se posea al momento de hacer el ajuste de datos esta no tendrá un sesgo muy amplio.

Además de los puntos de presencia se debe mencionar que las variables a presente utilizadas pasaron por un proceso de selección, en el cual, se realizaron tres agrupaciones distintas de variables con el fin de evaluar el comportamiento de la distribución potencial generada, sin embargo al final de este primer filtro de selección se determinó la utilización de 7 variables, que por consideraciones biológicas de la especie fueron las más importantes debido a que influyen significativamente en la fisiología de la achira.

Diversos trabajos han documentado la importancia de estimar el área de distribución potencial mediante la interpolación de datos de estaciones climatológicas y utilizando la elevación como covariable (Hijmans *et al.*, 2005, Soria-Auza *et al.*, 2010, Felicísimo *et al.*, 2011) para generar el grupo de variables climáticas a modelar (Lindenmayer *et al.*, 2000; Fischer *et al.*, 2001). Tal información se ha utilizado para contestar preguntas de índole biogeográfica (Nix, 1986), ecológica (Lindenmayer *et al.*, 1991), taxonómica (Fischer *et al.*, 2001), de conservación (Téllez y Dávila, 2003) o de aprovechamiento sustentable (Lindenmayer *et al.*, 1996). Se propone el uso de estos modelos para entender los aspectos relevantes de la distribución geográfica de las especies, así como las variables climáticas que determinan dicha distribución.

Debido a la complejidad de la información, sólo se aplicaron 3 modelos de circulación global (GCM) para evaluación y un modelo consenso de distribución potencial presente y la proyectada a futuro, es decir que en total se evaluó la cobertura del hábitat de la especie con 3 modelos climáticos y uno consenso que resume estas tres proyecciones. Estos mapas presentados pueden servir como base para orientar posibles trabajos futuros que definan con mayor precisión parte del nicho potencial de la especie, representado por su distribución geográfica. Por esta razón como paso adicional se podría comparar estos mapas de distribución con los que se obtengan mediante otras estrategias de modelación, como GARP (*Genetic Algorithm for Rule Set Prediction*) por sus siglas en inglés (Sánchez-Cordero *et al.*, 2001; Anderson *et al.*, 2003) y Random Forest (Amit y Geman, 1997; Ho, T., 1998; Breiman, L., 2001) entre otros.

De igual importancia para validar los modelos aquí presentados sería importante un trabajo de validación en campo en un futuro próximo para ayudar a registrar nuevos sitios de recolecta de la especie si los sitios se ubican dentro de las áreas estimadas para ayudar a dar robustez a los modelos de distribución y el impacto del cambio climático, así como incluir esta nueva información como base en análisis de sensibilidad a cambio climático posteriormente, además no es posible determinar cuánto sobreestima los modelos las áreas de distribución potencial solo con el uso de una estrategia de validación como el AUC, y será de suma importancia, el uso del *True Skill Statistic* o AUC corregido (Hijmans, R.J., 2012) para la optimización de los modelos generados y además con trabajo de campo se podrá determinar qué tanto de los sitios mostrados como vulnerables lo son en realidad. No obstante, los resultados sugieren que el método Maxent predice de manera satisfactoria la distribución potencial de las especies. Por lo tanto los mapas obtenidos pueden servir de guía para dirigir el trabajo de campo hacia sitios específicos como por ejemplo las áreas prioritarias para la conservación, donde según el modelo, las especies podrían encontrarse, pero para las cuales todavía no existe pruebas factibles de su presencia.

En cuanto al uso de un sólo GCM (Modelo de circulación global) no es suficiente para determinar una distribución potencial adecuada a futuro debido a que cada uno maneja condiciones climáticas únicas, por tanto es altamente recomendable el uso de varios de estos para poder obtener un consenso entre todos ellos que indique un

ajuste más probable de la realidad futura a partir del promedio de la probabilidad de ocurrencia generado, es decir que ese promedio de las probabilidades de presencia para cada modelo incluya la variabilidad de estos o que muestre un poco mejor el panorama mediante el uso de una medida de tendencia central como mediana, media o media ponderada (Mateo *et al*, 2011). Por esta razón es justificado el uso de un modelo consenso debido a que es mejor que utilizar un set de datos de variables promediadas porque lo que se busca es determinar la variación existente entre los tres modelos utilizados, ya que un consenso permite dar como un resultado un nivel general del comportamiento de los GCM y de la evaluación de su variación (Scheldeman, X. y Maarten van Z., 2011), como por ejemplo mediante el uso de las gráficas de temperatura anual y precipitación (Fig. 23) que indican las razones por las cuales existe esa distribución potencial a futuro y hacen más visibles las diferencias entre cada modelo de circulación global y el resultado del continuo desmedido de recursos como se ve reflejado en los GCM de familia de escenarios A2.

7.2. Efectos del cambio climático

El cambio climático en la agricultura es muy importante, pues esta variación climática mundial se ve reflejada en las condiciones aptas para el desarrollo y mantenimiento de especies vegetales y animales, ese cambio se ve reflejado en precipitaciones erráticas, propagación de plagas y enfermedades, degradación y desertificación del suelo, variación fenológica de las especies, incremento de productos de la canasta familiar, abandono de tierras y/o deslazamiento poblacional entre otros (Lau *et al*, 2012). Bajo este contexto la pérdida de hábitat de *C. indica* resultaría en aumentos en el costo de producción de elementos que sustituyan el almidón de la achira e incremento en los actuales productos derivados, ejemplo: Los biscochos de achira. Esta pérdida de cobertura de la especie, que se ha evaluado para el año 2020, implica la ausencia de la especie de 0.41% del total del territorio nacional motivo que genera preocupación, pues en tan sólo 6 años la historia de esta especie podría cambiar significativamente y todo lo relacionado entorno a ella, ya que el aumento en la precipitación y el poco aumento en la temperatura podrían propiciar la migración o la aparición de nuevas áreas disponibles para la achira, sin embargo la proyección a futuro presenta una media 0.95 °C de incremento en la temperatura anual y 35.57 mm de precipitación anual, indicando que podría haber una pérdida de hábitat promedio de 4.675 Km² en el 2020.

De acuerdo con Lau *et al* (2012), para el 2050 se espera un incremento de la temperatura promedio anual de 2.5°C y 2.5% en la precipitación promedio anual, comparado con la proyección de este estudio existe una relación significativa pues se tiene un incremento para el 2012 de 0.95°C y un 1.49% en la precipitación promedio anual, lo que indica que existe coherencia en los resultados. De acuerdo a lo anterior y realizando una interpolación aproximada entre la proyección generada a 2020 y la analizada por Lau *et al* (2012) para el 2050, se podría predecir que para el 2030 el incremento de temperatura anual promedio sería de 1.46°C y 1.82% de precipitación anual promedio y para el años 2040, sería de 1.98°C y 2.16% en promedio anual de

temperatura y precipitación respectivamente lo que llevaría a una pérdida paulatina de las zonas donde podría existir la achira hacia el futuro.

En cuanto a los rangos de temperatura en los que se ha reportado la especie son de 21 a 32 °C y de acuerdo a la distribución potencial generada, los departamentos en los que existe presencia poseen estas temperaturas, adicionalmente, las áreas con ausencia de la especie presentan en su mayoría precipitaciones menores a 1000 mm y éstas áreas podrían aumentar (Caicedo *et al*, 2003).

Los mapas de presencia-ausencia indicaron la variación del hábitat con el uso como criterio estadístico para esta investigación la máxima suma de especificidad y sensibilidad (SSS, por sus siglas en inglés)(Liu *et al*, 2013) como umbral por ser uno de los más utilizados en este tipo de estudios y la reclasificación cuyo criterio de presencia está dado por el umbral y la técnica que convirtió el mapa de probabilidades en uno de presencia-ausencia (mapa binario) (Scheldeman, X. y Maarten van Z., 2011). Teniendo en cuenta lo anterior y con base en los resultados obtenidos, las condiciones climáticas secas y de elevada temperatura podrían llevar a la pérdida de resiliencia de la especie afectando así la distribución potencial a futuro, mientras que las condiciones húmedas y bajas temperaturas afectan positivamente el hábitat.

Los mapas de distribución actual y futura permiten determinar el grado de cobertura que tiene y ha de presentar la especie a futuro, con lo cual se pueden tomar medidas preventivas para evitar la extinción del hábitat, se puede establecer un sistema de gestión de riesgo frente a la posibilidad de pérdida de esta cobertura, lo cual podría afectar de manera directa a la población rural que a través de sus costumbres ancestrales han mantenido la cultura que identifica la región huilense con sus famosas achiras y sostenido la economía de los núcleos familiares que dependen del sistema productivo, además de prevenir el deterioro del suelo, por ausencia de fertilidad, textura, estructura y demás que hacen estable los terrenos en los que se halla establecida la especie.

Además para los departamentos situados sobre la región andina se evidenciaron las mejores condiciones de hábitat para la especie debido al comportamiento climático de la zona, pues la achira tiene un desarrollo fisiológico favorable en regiones con un rango de altitud entre los 1000 y 1650 m.s.n.m. y precipitación promedio de 1000 a 1200 mm. Así mismo las regiones Pacífica y Amazónica son las que presentan mayor pérdida de hábitat y de acuerdo con Galvis y Roca (2010), se consideran estas como departamentos de periferia en donde se constituye un ejemplo de persistencia en los niveles de pobreza e inequidades representando un 38% de la población nacional lo que podría llevar al no aprovechamiento de comunidades indígenas, afrocolombianas y raizales del cultivo de achira.

Además teniendo en cuenta lo anterior y con base en los resultados obtenidos, las condiciones climáticas secas y de elevada temperatura podrían llevar a la pérdida de resiliencia de la especie afectando así la distribución potencial a futuro, mientras que

las condiciones húmedas y bajas temperaturas afectan positivamente el hábitat, y es recomendable usar variables de suelo o aumentar la resolución de análisis para obtener mejores resultados.

8. Conclusiones

El GCM CCMA_cgcm2 presentó una ganancia de cobertura a nivel nacional 0.02% (275 Km²), con un bajo incremento en la temperatura media anual y alto incremento en la precipitación media anual para el 2020, indicando que es un modelo favorable comparado con los demás GCM utilizados aunque sería óptimo evaluar esta aseveración usando una prueba de criterio de información bayesiano

Los datos de presencia de la especie coinciden con la distribución potencial generada, por tanto se puede decir que la calidad de la información utilizada es buena, es decir las capas, los modelos, el algoritmo, software y los puntos de presencia se acoplaron satisfactoriamente.

El hábitat de la especie es más óptimo sobre las áreas alrededor de las cordilleras es decir, en la región Andina y en una gran proporción en la región amazónica.

La precipitación se muestra como un factor limitante en la distribución potencial de la especie, ya que la especie se encontraría en zonas con mayores valores de precipitación y de bajo cambio en la temperatura a futuro.

Este estudio es el primero que se hace para *Canna indica*, utilizando modelación de nicho ecológico para la determinación del impacto del cambio climático, lo cual es muy importante porque podría generar nuevos estudios que contribuyan a la conservación del hábitat de la especie.

A pesar de que para uno de los tres modelos climáticos proyectados se observó una ganancia de hábitat, el panorama indica una pérdida de hábitat para el año 2020, si se continúa con la generación de emisiones de Dióxido de Carbono (CO₂) actual.

La distribución potencial actual y la proyectada a futuro permite que se evalúen las condiciones actuales referentes la conservación del hábitat de la especie en cada uno de los departamentos en donde se registra la presencia, para prevenir posibles pérdidas de área, los mapas generados permiten conocer de manera más gráfica que departamentos deben prestar especial atención en el impacto ambiental que ha de generar a futuro la especie.

9. Recomendaciones

Con el fin de evitar posibles errores en la georreferenciación y exportación al sistema de información se debe establecer una exhaustiva revisión de datos, antes de utilizarlos en la modelación, pues se podrían generar altos niveles de incertidumbre en los resultados finales.

Es importante realizar un análisis que incluya coberturas de suelos para evaluar el impacto generado por factores antrópicos tales como las malas prácticas agrícolas que incluyen en monocultivo, mal uso de plaguicidas y fertilizantes químicos, mal laboreo mecánico, deforestación como generadoras de erosión, desequilibrio ambiental, entre otros.

Se debería utilizar otros modelos climáticos proyectados a futuro para luego comparar los resultados y determinar cuál es el más indicado de acuerdo a la especie seleccionada.

Es recomendable comparar los resultados generados con otros estudios referentes a cambio climático, para determinar si existe una tendencia que amenace otras especies y que coincida con las áreas de pérdida de cobertura de la achira.

Se debe procurar que los datos de presencia utilizados se hayan determinado de acuerdo a la investigación a realizar, pues muchos de los datos de presencia existentes están colectados por diferentes fines y diferentes recolectores, sin una estrategia común de muestreo, por lo que muchas veces son una representación sesgada de la distribución de la especie.

Incluir dentro de la modelación climática factores agronómicos, adaptación, rendimiento y producción de la especie para complementar la información existente de *C. indica*.

Es importante evaluar el modelo con diferentes umbrales, pues cada modelo posee un supuesto, esta evaluación permitirá realizar planes de manejo de la especie a futuro.

Para este estudio se trabajó con capas climáticas con resolución 2.5 Arc-minutos, es decir un tamaño de 5 Km² por celda, sin embargo se recomienda utilizar un pixelaje más fino como 30 segundos, el cual emplea un tamaño de 1 Km² por celda con el fin de lograr mayor precisión en la distribución.

Bibliografía

Amit, Y.; Geman, D., 1997. Shape Quantization and Recognition with Randomized Trees. *Neural Computation* 9 (7): 1545–1588p.

Anderson, R. P.; Lew, D.; Peterson, A. T., 2003. Evaluating Predictive Models of Species Distributions: Criteria for Selecting Optimal Models. *Ecological Modelling* 162: 211-232p.

Anderson, R.P.; Martinez-Meyer, E., 2004. Modeling Species Geographic Distributions for Preliminary Conservation Assessments: an Implementation with the Spiny Pocket Mice (Heteronmys) of Ecuador. *Biol. Conser.* 116, 167–179p.

Araújo, MB., Pearson, RG., Thuiller, W., Erhard, M. 2005. Validation of Species–climate Impact Models Under Climate Change. *Global Change Biology* 11: 1504–1513p.

Araújo, MB.; Guisan, A., 2006. Five (or so) Challenges for Species Distribution Modelling. *Journal of Biogeography* 33: 1677-1688p.

Araújo, M.B.; New, M., 2007. Ensemble Forecasting of Species Distributions. *Trends in Ecology & Evolution* 22: 42-47p.

Bisby, FA., 2000. The Quiet Revolution: Biodiversity Informatics and the Internet. *Science* 289: 2309-2312p.

Booth, T.H.; K.J. Williams. 2012. Developing Biodiverse Plantings Suitable for Changing Climatic Conditions 1: Underpinning Scientific Methods. *Ecol. Manag. Restor.* 13: 267–273p.

Brako, L.; Zarucchi, J.L. 1993. Catalogue of the Flowering Plant and Gymnosperms of Peru. *Monographs in Systematic Botany from the Missouri Botanical Garden* 45: I-XI: 1-1286p.

Breiman, L., 2001. Random Forests. *Machine Learning* 45 (1): 5–32p.

Buckley, L.B., M.C. Urban, M.J. Angilletta, *et al.* 2010. Can Mechanism Inform Species Distribution Models? *Ecol. Lett.* 13: 1041–1054p.

Buckley, L.B. 2013. Get Real: Putting Models of Climate Change and Species Interactions in Practice. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1297: 126–138p.

Busy, J.R., 1986. Bioclimate Prediction System (BIOCLIM). User's Manual Version 2.0. Australian Biological Resources, Study Leaflet, Canberra, Australia.

Busy, J.R., 1991. BIOCLIM: A Bioclimate Analysis and Prediction System. En: Margules CR & MP Austin (Eds) Nature conservation: Cost Effective Biological Surveys and Data Analysis. CSIRO, Melbourne, Australia.

Caicedo, G.; Rozo, S.; Rengifo, G. 2003. La Achira, Alternativa Agroindustrial para áreas de Economía Campesina. Técnicas de Cultivo, Beneficio o Proceso de Poscosecha y Uso Agroindustrial. Proyecto CORPOICA – PRONATTA. 87p.

Campbell, N.E., 1996. Biology. The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., Menlo Park, California.

Cobo, B. [1653] 1890-1895. Historia del Nuevo Mundo. Ed. Marcos Jiménez de la Espada. 4 vol. Sociedad de Bibliófilos Andaluces, Sevilla.

Cohen Mark, N. 1978. Archaeological Plant Remains from the Central Coast of Peru. *Ñawpa Pacha*. 16: 23-50p.

CORPOICA, 2001. Análisis Socioeconómico y Técnico de la Minicadena Agroindustrial de la Achira. Consultado 25 de Julio de 2013. <http://corpomail.corpoica.org.co/bacdigital/contenidos/catalogo.asp?CA=45847>

CORPOICA, 2003. El Cultivo de la Achira. Una Alternativa de Producción, Diversificación y Mejoramiento de Ingresos para el Pequeño Productor. Neiva

Elton, C., 1927. *Animal Ecology*. Sedgwick and Jackson, Londres, Inglaterra.

FAO, 2009. Declaración de la Cumbre Mundial sobre la Seguridad Alimentaria. WSFS 2009/2. Roma. Consultado 25 de Julio de 2013. <http://www.fao.org/wsfs/cumbre-mundial/es/>

FAO/RLC, 2010. Políticas de seguridad, Inocuidad y Calidad Alimentaria en América Latina y el Caribe. Foro Regional “Políticas de Seguridad e Inocuidad y Calidad Alimentaria: Casos Exitosos de Integración. Santiago de Chile. 49 p. Consultado 25 de julio de 2013. <http://www.cvpconosur.org/wp-content/uploads/2010/08/seguridad-alimentaria-2010.pdf>

Felicísimo, Am.; Gómez, A. ; Muñoz, J., 2005. Potential Distribution of Forest Species in Dehesas of Extremadura (Spain). Schnabel, S. & Ferreira, A., (Eds) Sustainability of Agrosilvopastoral Systems-dehesa. *Advances in GeoEcology* 37: 231-246p. Catena Verlag, Reiskirchen.

Felicísimo, AM., Muñoz, J., Villalba, C. y Mateo, RG., 2011. Análisis de impactos y

vulnerabilidad de la flora y vegetación españolas ante el cambio climático. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, Madrid, España.

Fischer, J.; Lindenmayer, D. B. ; Nix, H. A.; Stein, J. L.; Stein, J. A. , 2001. Climate and Animal Distribution: A Climatic Analysis of the Australian Marsupial *Trichosurus Caninus*. *Journal of Biogeography* 28: 293-304p.

Flora of China Editorial Committee, 2000. Flora of China (Flagellariaceae through Marantaceae). 24: 1–431p. In C. Y. Wu, P. H. Raven & D. Y. Hong (eds.) *Fl. China*. Science Press & Missouri Botanical Garden Press, Beijing & St. Louis.

Gade, D.W., 1966. Achira, the Edible Canna, its Cultivation and Use in the Peruvian Andes. *Economic Botany* 20 (4): 407-415p.

Galvis, L.; Roca, A., 2010. Persistencia de las Desigualdades Regionales en Colombia: Un análisis Espacial. *Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional (N°120)*. 35p.

Gamez, R., 2011. Guía para la Elaboración de Mapas de Distribución Potencial. Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad Veracruzana. México. 54p. Consultado el 5 de Junio de 2014. <http://www.uv.mx/personal/mgamez/files/2010/07/guia-version-germoplasma.pdf>

Grinnell, J., 1917. The Niche Relationship of the California Thrasher. *Auk* 34: 427-433p.

Guisan, A.; Zimmermann, NE, 2000. Predictive Habitat Distribution Models in Ecology. *Ecological Modelling* 135: 147-186p.

Guralnick, P.; Hil, AW.; Lane M., 2007. Towards a Collaborative, Global Infrastructure for Biodiversity Assessment. *Ecology Letters* 10: 663-672p.

Graham, M.H., 2003. Confronting Multicollinearity in Ecological Multiple Regression. *Ecology* 84: 2809-2815p.

Herrera, F. L. 1942a. Etnobotánica. Plantas Tropicales Cultivadas por los Antiguos Peruanos. *Revista del Museo Nacional (Perú)*. 11(2):179-195p.

Herrera, F. L., 1942b. Plantas Endémicas Domesticadas por los Antiguos Peruanos. *Revista del Museo Nacional (Perú)*. 11(1):25-30p.

Hijmans, RJ.; Cameron, SE.; Parra, JL.; Jones, PG.; Jarvis, A., 2005. Very High Resolution Interpolated Climate Surfaces for Global Land Areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978p.

Hijmans, R.; Graham, C., 2006. The Ability of Climate Envelope Models to Predict the Effect of Climate Change on Species Distributions. *Global Change Biology*.

Hijmans, R.J., 2012. Cross-validation of Species Distribution Models: Removing Spatial Sorting Bias and Calibration with a Null Model. *Ecology* (3): 679-88p.

Hirzel, A.H.; Lay, G.L., 2008. Habitat Suitability Modelling and Niche Theory. *Journal of Applied Ecology* 45: 1372-1381p.

Ho, T., 1998. The Random Subspace Method for Constructing Decision Forests. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 20 (8): 832-844p.

Hopkins, M.J.G. 2007. Modelling the Known and Unknown Plant Biodiversity of the Amazon Basin. *Journal of Biogeography* 34: 1400-1411p.

Hutchinson, G.E., 1957. Concluding Remarks. In: *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology* 22, 415-427p.

IGAC, 1999. Atlas de Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

IPCC, 2000. Escenarios de Emisiones. Resumen para Responsables de Políticas. Informe Especial del Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (IPCC).

IPCC, 2007. Summary for Policymakers. In: *Climate Change. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2013. *Climate Change. The Physical Science Basis, Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Consultado el 2 de abril de 2014. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>

Kearney, M., 2006. Habitat, Environment And Niche: What Are We Modelling? *OIKOS* 115: 186-191p.

Kearney, M. & W. Porter. 2009. Mechanistic Niche Modelling: Combining Physiological and Spatial Data to Predict Species Ranges. *Ecol. Lett.* 12: 334-350p.

Kuankonn, P.; Sunne, C; Chukiet, K.; Ratchata, T.; Siripart, P.; Christopher, G.; Klanarong, S. 2001. Edible Canna (*Canna edulis*) as a Complementary Starch Source to Cassava for the Starch Industry. Industrial Crops and Products. Elsevier

Lau, C.; Jarvis, A.; Ramirez, J. 2012. Agricultura Colombiana: Adaptación al Cambio Climático. CIAT Políticas en Síntesis no. 1. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 4 p.

León, J., 1968. Fundamentos Botánicos de los Cultivos Tropicales. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA. Primera Edición. IICA Costa Rica, 127-128p.

Lindenmayer, D. B.; Nix, H. A.; McMahon, J. P.; Hutchinson, M. F.; Tanton, M. T. , 1991. The Conservation of Leadbeater's Possum, *Gymnobelideus Leadbeateri* (McCoy): A Case Study of the Use of Bioclimatic Modeling. *Journal of Biogeography* 18: 371-383p.

Lindenmayer, D. B.; Mackey, B. G. ; Nix, H. A. , 1996. The Bioclimatic Domains of Four Species of Commercially Important Eucalypts from South-eastern Australia. *Australian Forestry* 59: 74-89p.

Lindenmayer, D. B.; Mackey, B. G.; Cunningham, R. B.; Donnelly, C. F.; Mullen, I. C.; McCarthy, M. A; Gill, A. M., 2000. Factors Affecting the Presence of the Cool Temperate Rain Forest Tree Myrtle Beech (*Nothofagus unninghamii*) in Southern Australia: Integrating climatic, Terrain and Disturbance Predictors of Distribution Patterns *Journal of Biogeography* 27: 1001-1010p.

Liu, C.; White, M.; Newel, G., 2013. Selecting Thresholds for the Prediction of Species Occurrence with Presence-only Data. *Journal of Biogeography* (J. Biogeogr.) Arthur Rylah Institute for Environmental Research, Department of Sustainability and Environment, Heidelberg, Victoria 3084, Australia. 12p.

Marmion, M.; Parviainen, M.; Luoto, M.; Heikkinen, R.K.; Thuiller, W., 2009. Evaluation of Consensus Methods in Predictive Species Distribution Modelling. *Diversity and Distributions* 15: 59-69p.

Mateo, R.; Felicísimo, A.; Muñoz, J., 2011. Modelos de Distribución de Especies: Una Revisión Sintética. *Revista Chilena de Historia Natural* 84: 217-240p.

Mateos, F. ét. préI; Cobo, B., 1956. Obras del P. Bernabé Cobo de la Compañía de Jesús. Madrid: Atlas, 515 p.

Muñoz, J.; Felicísimo, A.M., 2004. A Comparison Between Some Statistical Methods Commonly Used in Predictive Modeling. *Journal of Vegetation Science* 15: 285-292p.

National Research Council (NRC), 2006. Surface Temperature Reconstructions for the Last 2,000 Years. National Academy Press, Washington, DC.

Newbold, T. 2010. Applications and Limitations of Museum Data for Conservation and Ecology, with Particular Attention to Species Distribution Models. *Prog. Phys. Geogr.* 34: 3–22p.

Nix, H. A., 1986. A Biogeographic Analysis of the Australian Elapid Snakes. In: R. Longmore (ed.) *Atlas of Elapid Snakes*. Australian Flora and Fauna Series No. 7, 4-15p.

OIT, 2007. Organización Internacional del Trabajo. República de Colombia. Consultado el 24 de Abril de 2014.
[http://intranet.oit.org.pe/WDMS/bib/virtual/perfiles/col_mon\[07\].pdf](http://intranet.oit.org.pe/WDMS/bib/virtual/perfiles/col_mon[07].pdf)

Odum, E. P., 1959. *Fundamentals of Ecology*. W. B. Sanders, Philadelphia.

Olivier, F.; Wotherspoon, S. J., 2006. Modelling Habitat Selection Using Presence-only Data: Case Study of a Colonial Hollow Nesting Bird, the Snow Petrel. *Ecological Modelling* 195: 187-204p.

Ottaviani, D.; Lasinio, G.J.; Boitani, L., 2004. Two Statistical Methods to Validate Habitat Suitability Models Using Presence-only Data. *Ecological Modelling* 179: 417-443p.

Papes, M. y Gaubert, P., 2007. Modelling Ecological Niches from Low Numbers of Occurrences: Assessment of the Conservation Status of Poorly Known Viverrids (Mammalia, Carnivora) Across Two Continents. *Diversity and Distributions* 13: 890-902p.

Parra-Huertas, R. A., 2012. Caracterización Fisicoquímica y Sensorial de una Compota a Partir de Gulupa (*Passiflora Edulis*) Almidón de Sagú (*Canna Edulis*) y Stevia Vitae, vol. 19, núm. 1. Universidad de Antioquia Medellín, Colombia. Consultado el 25 de Julio de 2013. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169823914064>

Pearson, R. G. ; Dawson, T. P., 2003. Predicting the Impacts of Climate Change on the Distribution of Species: Are Bioclimate Envelope Models Useful? *Global Ecology and Biogeography* 12: 361-371p.

Peterson, A. T.; Egbert, S. L.; Sánchez-Cordero, V.; Price, K. P. , 2000. Geographic Analysis of Conservation Priorities Using Distributional Modeling and Complementarity: Endemic Birds and Mammals in Veracruz, Mexico. *Biological Conservation* 93: 85-94p.

Peterson, A. T. ; Vieglais, D. A., 2001. Predicting Species Invasions Using Ecological Niche Modeling: New Approaches from Bioinformatics Attack a Pressing Problem. *BioScience* 51: 363-371p.

Peterson, A.T., 2006. Uses and Requirements of Ecological Niche Models and Related Distributional Models. *Biodiversity Informatics* 3: 59-72p.

Pearson, R.G. 2007. Species Distribution Modeling for Conservation Educators and Practitioners. Synthesis. American Museum of Natural History. Consultado el 20 de enero de 2014. <http://ncep.amnh.org>

Phillips, S. J. *et al*, 2004. A Maximum Entropy Approach to Species Distribution Modeling. In: Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning. ACM Press, New York, pp. 472-486p.

Phillips, S. J. *et al*, 2006. Maximum Entropy Modeling Of Species Geographic Distributions, *Ecological Modelling*, 190:231-259p.

Phillips, S. J.; Miroslov, Dudík, 2008. Modeling of Species Distributions With Maxent: New Extensions And a Comprehensive Evaluation, *Ecography*, 31:161-175p.

Pulliam, Rh. 2000. On The Relationship Between Niche and Distribution. *Ecology Letters* 3: 349-361p.

Reddy, S.; Dávalos, LM., 2003. Geographical Sampling Bias and its Implications for Conservation Priorities in Africa. *Journal of Biogeography* 30: 1719-1727p.

Ricklefs, R.E., 1996. *A Economia da Natureza*. Editora Guanabara Koogan S.A., Rio de Janeiro.

Sánchez-Cordero, V.; Peterson, A. T.; Escalante-Pliego, P. , 2001. El Modelado de la Distribución de Especies y la Conservación de la Diversidad Biológica. In: H. M.

Sauer, C.O., 1952. Cultivated Plants of South and Central America. Handbook of Southamerican Indians. Bureau of American Ethnology, Washington. Vol 6: 487-543p.

Scheldeman, X. y Maarten van Z., 2011. Manual de Capacitación en Análisis Espacial de Diversidad y Distribución de Plantas. Bioersivity International, Roma, Italia. 186 pp.

Schulman, L.; Toivonen, T.; Ruokolainen, K., 2007. Analysing Botanical Collecting Effort in Amazonia and Correcting for it in Species Range Estimation. *Journal of Biogeography* 34: 1388-1399p.

Seminario, J. (ed.). 2004. Raíces Andinas: Contribuciones al Conocimiento y a la Capacitación. Serie: Conservación y Uso de la Biodiversidad de Raíces y Tubérculos

Andinos: Una Década de Investigación para el Desarrollo (1993-2003) No. 6. Universidad Nacional de Cajamarca, Centro Internacional de la Papa, Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación. Lima, Peru, 376 p.

Soberón, J.; A.T. Peterson. 2004. Biodiversity Informatics: Managing and Applying Primary Biodiversity Data. *Philos. Trans. R. Soc. Lond., Ser. B, Biol. Sci.* 359: 89–698p.

Soberón, J., 2007. Grinnellian and Eltonian Niches and Geographic Distributions of Species. *Ecology Letters* 10: 1115-1123p.

Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.), 2007. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Consultado el 25 de Julio de 2013. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html

Soria-Auza, RW.; Kessler, M.; BACH, K.; Barajas-Barbosa, PM.; Lehnert *et al.*, 2010. Impact of the Quality of Climate Models for Modelling Species Occurrences in Countries with Poor Climatic Documentation: A Case Study from Bolivia. *Ecological Modelling* 221: 1221-1229p.

Téllez, V.O.; Dávila, A. 2003. Protected Areas and Climatic Change: A Case Study of the Cacti in the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve, Mexico. *Conservation Biology* 17: 846-853p.

Townsend Peterson, A., Soberón, J., Pearson, R. G., Anderson, R. P., Martinez-Meyer, E., Nakamura, M. , Araújo, M. B. 2011. *Ecological Niches and Geographic Distributions. Monographs in Population Biology* n° 49. Princeton University Press.

Tsoar, A.; Allouche, O.; Steinitz, O.; Rotem, D.; Kadmon, R., 2007. A Comparative Evaluation of Presence-only Methods for Modelling Species Distribution. *Diversity and Distributions* 13: 397- 405p.

UNFCCC, 2013. United Nations Framework Convention on Climate Change, article 1. Numeral 2. Consultado 25 de Julio de 2013. http://unfccc.int/essential_background/convention/background/items/2536.php

Vandermeer, J. H., 1972. Niche Theory. *Annual Review of Ecology and Systematics* 3:107-132.

Vavilov, N.I. 1951. *Estudios Sobre el Origen de las Plantas Cultivadas*. Es. Buenos Aires, Argentina. Acme Agency. 185p.

Vetaas, Or., 2002. Realized and Potential Niches: A Comparison of Four Rhododendron Tree Species. *Journal of Biogeography* 29: 545-554p.

Yuhong, H.; Yanling, j.; Yang, F.; Yuhao, L.; Hai, Z. 2013. Simultaneous Utilization of Non-starch Polysaccharides and Starch and Viscosity Reduction for Bioethanol Fermentation from Fresh *Canna edulis* Ker. Tubers. *Bioresource Technology* 128. 560-564 p. Elsevier.

Zaniewski, A.; Lehmann, A.; Overton, J., 2002. Predicting Species Spatial Distributions Using Presence-only Data: A Case Study of Native New Zealand Ferns. *Ecological Modelling* 157: 261-280p.

Anexos

Tabla 5. Fuentes de los puntos de presencia usados para la modelación del nicho ecológico.

| FUENTE | ORIGEN |
|---|---|
| Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt* | Colección Herbario Federico Medem Bogotá – FMB |
| Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (SINCHI)* | Herbario Amazónico Colombiano |
| Corporación Autónoma Regional Para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga* | Herbario CDMB - Jardín Botánico Eloy Valenzuela |
| Universidad de La Salle* | Herbario Museo de La Salle Bogotá (MLS) |
| SIB Colombia* | Registros biológicos Colombianos repatriados |

*Datos obtenidos de GBIF

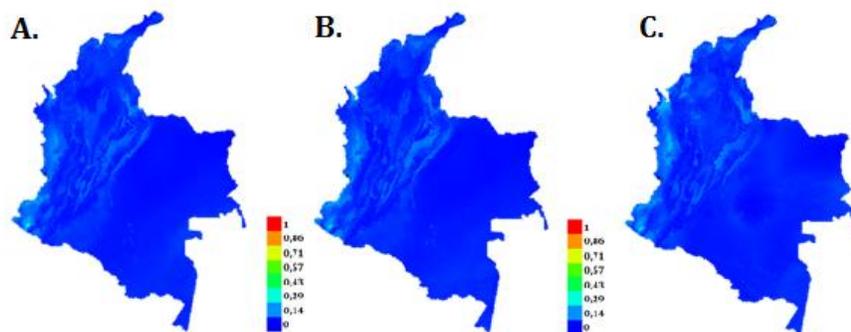


Fig. 26. Mapas de desviación estándar de la distribución potencial actual. A.) CSIRO_mk3_5 B.) UKMO_hadcm3 C.) CCMA_cgcm2

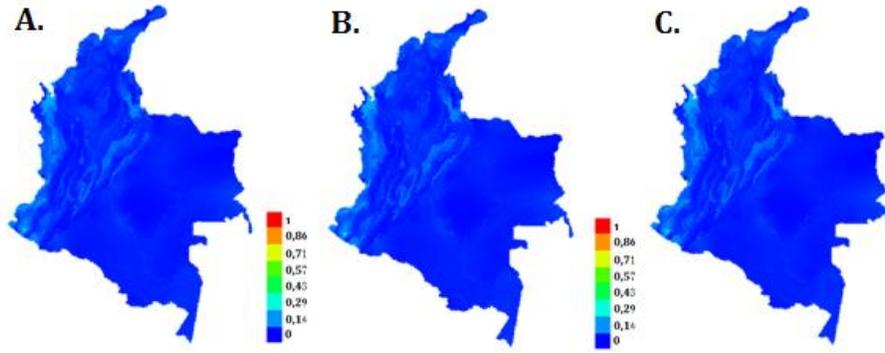


Fig. 27. Mapas de desviación estándar de la distribución potencial proyectada a futuro. A.) CSIRO_mk3_5 B.) UKMO_hadcm3 C.) CCMA_cgcm2

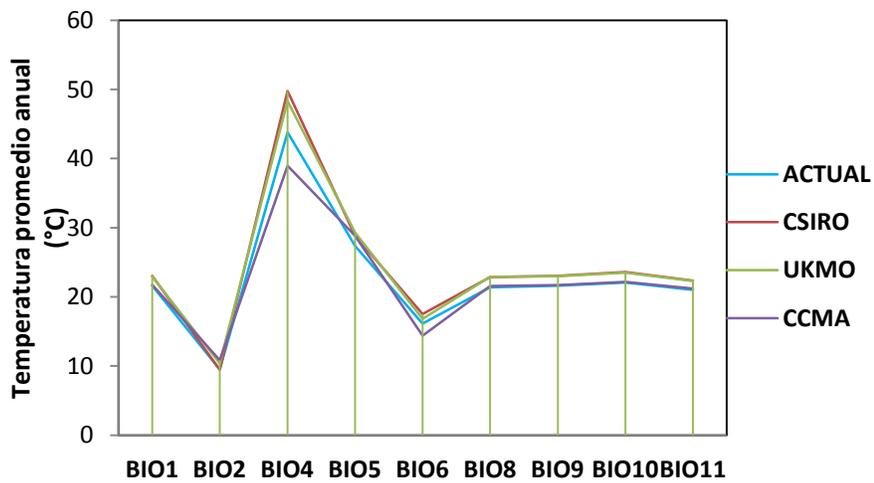


Fig. 28. Comportamiento de las variables de temperatura (BIOCLIM) actual y futura.

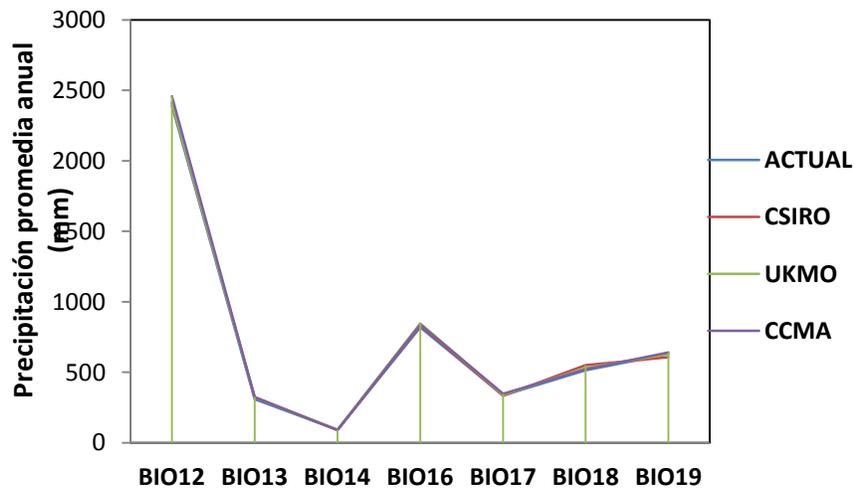


Fig. 29. Comportamiento de las variables de precipitación actual y futura.