



Informe Final del Proyecto

Predicción y evaluación del impacto del cambio climático sobre los sistemas agroforestales en la amazonia peruana y andina ecuatoriana

*Efraín Leguía,
Manuel Soudre,
Marcos Rognitz,*

Pucallpa-Perú
Julio del 2010

Antecedentes

A mediados del año del 2008, el consorcio formado por el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) de España, el Centro de Investigación Forestal Internacional (CIFOR) en Indonesia, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) de Costa Rica, La Universidad Politécnica de Madrid (UPM) de España y Centros de Investigación del Sistema de los INIA de Iberoamérica; a través del proyecto cooperativo sobre Mitigación y Adaptación al Cambio Climático en la Gestión Forestal Sostenible en Iberoamérica (MIA) lanzaron la convocatoria para propuestas de proyectos de investigación denominada “Fondo de apoyo a proyectos de investigación en mitigación y adaptación al cambio climático en la gestión forestal sostenible”.

La propuesta “Predicción y evaluación del impacto del cambio climático sobre los sistemas agroforestales en la amazonia peruana y andina ecuatoriana” nace de la iniciativa de tres instituciones líderes en investigación de la región amazónica en su afán de contribuir al entendimiento de los posibles impactos del cambio climático sobre los ecosistemas agroforestales, de tal manera se puedan plantear programas de adaptación y conservar el flujo de servicios ecosistémicos que estos proveen a las sociedades.

IIAP e ICRAF agradecen el apoyo incondicional y desinteresado de las siguientes personas:

Julian Ramirez (especialista SIG-CIAT, Colombia)

Emmanuel Zapata (especialista SIG-CIAT, Colombia)

Andrew Jarvis (especialista SIG-CIAT, Colombia)

Elizabeth Barona (especialista SIG-CIAT, Colombia)

Abel Meza (ICRAF, Perú)

Diego García (IIAP-Pucallpa)

Hector Guerra (IIAP-Pucallpa)

Ranfol Cardenas (Asociación de Productores Tecnificados de Padre Abad)

Enrique Arévalo (Instituto de Estudios Tropicales)

Alex Agramonte (Proyecto de Desarrollo Alternativo)

Glosario

ACATPA	:	Asociación de Cacaoteros Tecnicados de Padre Abad
CATIE	:	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
CIAT	:	Centro Internacional de Agricultura Tropical
CIFOR	:	Centro Internacional de Forestarías
FAO	:	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación
ICRAF	:	Centro Mundial de Agroforestería
ICT	:	Instituto de Cultivos Tropicales
IIAP	:	Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana
INIA	:	Instituto de Nacional de Innovación Agraria
IPCC	:	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
GBIF	:	<i>Global Biodiversity Information Facility</i>
PDA	:	Programa de Desarrollo Alternativo
GCM	:	Modelos de Circulación Global
GEI	:	Gases de efecto invernadero

Predicción y evaluación del impacto del cambio climático sobre los sistemas agroforestales en la amazonia peruana y andina ecuatoriana

Índice

1.	Resumen	9
2.	Introducción	10
2.1	Objetivo.....	11
2.2	Antecedentes del proyecto	11
3.	Marco teórico.....	12
3.1	Sistemas agroforestales	12
3.2	Variabilidad climática y cambio climático	12
3.3	Cambio climático y sistemas agroforestales.	13
3.4	Vulnerabilidad.....	14
3.5	La zonificación edafoclimática como herramienta de selección de sitios y toma de decisión.....	16
3.6	Métodos para evaluar el impacto del cambio climático.....	18
3.6.1	Descripción de Maxent.....	20
4.	Metodología.....	21
4.1	Descripción de la zona de estudio.....	21
4.2	Definición de criterios para la selección de especies evaluadas	22
4.3	Especies seleccionadas.....	23
4.3.1	Bolaina Blanca (<i>Guazuma crinita</i>)	23
4.3.2	Capirona (<i>Calycophyllum spruceanum</i>)	23
4.3.3	Cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.).....	24
4.4	Requerimientos edafoclimáticos de las especies estudiadas.....	25
4.5	Ubicación de las colecciones de componentes de los SAF.....	25
4.6	Climatología actual: variables bioclimáticas	26
4.7	Datos climáticos futuros	27
4.8	Pasos para predicciones actuales y futuras con Maxent	27
4.9	Uso de ArcGis para generar mapas.....	29
4.10	Validación de resultados y taller con expertos.....	29
5.	Resultados.....	30
5.1	Requerimientos climáticos para bolaina, capirona y cacao	30
5.2	Bolaina blanca (<i>Guazuma crinita</i>)	34
5.2.1	Análisis de contribución e importancia de variables en la predicción de adecuación de bolaina.....	37
5.3	Capirona (<i>Calycophyllum spruceanum</i>)	40
5.3.1	Análisis de contribución e importancia de variables en la predicción de adecuación de capirona.....	44
5.4	Cacao (<i>Theobroma cacao</i>).....	47
5.4.1	Parcelas comerciales de ACATPA, PDA y GBIF	47
5.4.2	Parcelas comerciales de cacao de alta productividad. Colecta ICT.....	53
5.5	Como incluir variables edáficas en las proyecciones.	58

5.6	Sistemas agroforestales y cambio climático	61
6.	Discusión	64
6.1	Aspectos metodológicos	64
6.1.1	Sensibilidad al tamaño y la distribución de los puntos muestreados.....	65
6.2	Selección de software	66
6.3	Sensibilidad a la reclasificación.....	66
7.	Referencias	68

Lista de tablas

Tabla 1:	Requerimientos climáticos de las especies seleccionadas para la cuenca Aguaytía, Perú.....	25
Tabla 2:	Reclasificación de los rangos de adecuación para bolaina, capirona y cacao	29
Tabla 3:	Resumen de las variables bioclimáticas en los puntos de muestreo de bolaina	31
Tabla 4:	Resumen de las variables bioclimáticas en los puntos de muestreo de capirona	31
Tabla 5:	Resumen de las variables bioclimáticas en los puntos de muestreo de cacao de alta productividad	32
Tabla 6:	Resumen de las variables bioclimáticas en los puntos de muestreo de parcelas de cacao de PDA, ACATPA y GBIF	33
Tabla 7:	Adecuación del cacao comercial de alto rendimiento a la climatología actual y futura. Datos a nivel nacional.....	55
Tabla 8:	Adecuación del cacao comercial de alto rendimiento a la climatología actual y futura. Datos a nivel de cuenca	55
Tabla 9:	Principales impactos sobre las especies analizadas.....	62
Tabla 10:	Principales recomendaciones de manejo agroforestal	63
Tabla 11:	Colectas de <i>G. crinita</i> y <i>C. spruceanum</i> durante 1996.....	69
Tabla 12:	Colectas de <i>G. crinita</i> durante 1998	70

Lista de figuras

Figura 1:	Variabilidad climática y cambio climático	12
Figura 2:	Factores limitantes para <i>P. radiata</i> . Notar que la especie nunca alcanza su potencial óptimo porque al menos un factor es siempre limitante (ej. El viento). Fuente: Hackett y Vanclay (1998).	18
Figura 3:	Cuenca del río Aguaytía, Pucallpa-Perú	22
Figura 4:	Ubicación de las parcelas de boliana, capirona y parcelas comerciales de cacao.....	26

Figura 5: Mapas de la distribución potencial de la bolaina blanca (<i>Guazuma crinita</i>) en Perú en escenario actual y futuro (año 2020 y 2050; modelos HADCM3 y CCMA-CGCM2, escenario A2a)	35
Figura 6: Potencial cambio en la distribución de la bolaina blanca (<i>Guazuma crinita</i>) en Peru frente a escenarios futuro (año 2020 y 2050; modelo HADCM3, CCMA-CGCM2 escenario A2a)	35
Figura 7: Mapas de la distribución potencial de la bolaina blanca (<i>Guazuma crinita</i>) en la cuenca Aguaytía en escenario actual y futuro (año 2020 y 2050; modelo HADCM3, escenario A2a).	36
Figura 8: Mapas del potencial cambio en la distribución de bolaina blanca (<i>Guazuma crinita</i>) en la cuenca Aguaytía frente escenarios futuro (año 2020 y 2050; modelo HADCM3, escenario A2a).	36
Figura 9: Potencial cambio en la distribución de bolaina blanca (<i>Guazuma crinita</i>) en la cuenca del rio Aguaytía frente a escenarios futuro (año 2020 y 2050; modelo HADCM3 y CCMA-CGCM2 escenario A2a, escenario A2a).....	37
Figura 10: Contribución relativa de las variables climáticas al modelo Maxent para la predicción de la adecuación de bolaina	38
Figura 11: Prueba de jackknife para importancia de variables predicción de adecuación de bolaina	39
Figura 12: Mapas de la distribución potencial de la capirona (<i>Calycophyllum spruceanum</i>) en Perú en escenario actual y futuro (año 2020 y 2050; modelo HADCM3 y CCMA-CGCM2, escenario A2a).	41
Figura 13: Potencial cambio en la distribución de la capirona (<i>Calycophyllum spruceanum</i>) en Peru frente a escenarios futuro (año 2020 y 2050; modelo HADCM3, CCMA-CGCM2 escenario A2a)	42
Figura 14: Mapas de la distribución potencial de la capirona (<i>Calycophyllum spruceanum</i>) en la cuenca Aguaytía en escenarios actual y futuro (año 2020 y 2050; modelo HADCM3, escenario A2a).	43
Figura 15: Mapas del potencial cambio en la distribución de la capirona (<i>Calycophyllum spruceanum</i>) en la cuenca Aguaytía frente a escenarios futuro (año 2020 y 2050; modelo HADCM3, escenario A2a).	43
Figura 16: Proporción del potencial cambio en la distribución de la capirona (<i>Calycophyllum spruceanum</i>) en la cuenca Aguaytía frente a escenarios futuro (año 2020 y 2050; modelo HADCM3 y CCMA-CGCM2, escenario A2a).	44
Figura 17: Contribución relativa de las variables climáticas al modelo Maxent para la predicción de la adecuación de capirona	45
Figura 18: Prueba de jackknife para importancia de variables predicción de adecuación de capirona	46

Figura 19: Mapas de la distribución potencial del cacao (<i>Theobroma cacao</i>) en Perú, en escenarios actual y futuro (año 2020 y el 2050; modelos HADCM3 y CCMA-CGCM2, escenario A2a).	48
Figura 20: Potencial cambio en la distribución de la distribución del cacao (<i>Theobroma cacao</i>) en Peru frente a escenarios futuro (año 2020 y 2050; modelo HADCM3 y CCMA-CGCM2, escenario A2a)	49
Figura 21: Mapas de la distribución potencial cacao (<i>Theobroma cacao</i>) en en la cuenca Aguaytía en escenarios actual y futuro (año 2020 y el 2050; modelo HADCM3, escenario A2a).	50
Figura 22: Mapas del potencial cambio en la distribución cacao (<i>Theobroma cacao</i>) en la cuenca Aguaytía, comparando el escenario actual y futuro (año 2020 y el 2050; modelo HADCM3, escenario A2a).	50
Figura 23: Potencial cambio en la distribución de la distribución cacao (<i>Theobroma cacao</i>) en la cuenca Aguaytía frente escenarios futuro (año 2020 y el 2050; modelo CCCMA-CGCM2, escenario A2a).	51
Figura 24: Contribución relativa de las variables climáticas al modelo Maxent para la predicción de la adecuación de cacao comercial.	52
Figura 25: Prueba de jacknife para importancia de variables predicción de adecuación de cacao comercial	53
Figura 26: Mapas de la distribución potencial del cacao de alta productividad (<i>Theobroma cacao</i>) en Perú, en escenarios actual y futuro (año 2020 y el 2050; modelos HADCM3 y CCMA-CGCM2, escenario A2a).	54
Figura 27: Mapas de la distribución potencial cacao de alto rendimiento (<i>Theobroma cacao</i>) en en la cuenca Aguaytía en escenarios actual y futuro (año 2020 y el 2050; modelo HADCM3, escenario A2a).	55
Figura 28: Contribución relativa de las variables climáticas al modelo Maxent para la predicción de la adecuación de cacao de alta productividad	57
Figura 29: Prueba de jacknife para importancia de variables predicción de adecuación de cacao de alto rendimiento.	58
Figura 31: Condiciones edáficas favorables y adecuación climatológica de la bolaina bajo condiciones actuales	59
Figura 30: Macrozonificación para boliana en la cuenca del río Aguaytía, Soudre (2008).	59
Figura 32: Comparación de adecuación climatológica y condiciones de suelo favorables para la bolaina	60
Figura 33: Condiciones edáficas favorables y adecuación climatológica de la capirona bajo condiciones actuales	60
Figura 34: Comparación de adecuación climatológica y condiciones de suelo favorables para la capirona	61

Figura 35: Sensibilidad del modelo al tamaño y distribución de las muestras..... 65

Figura 36: Resultados de la predicción de condiciones climatológicas actuales para el desarrollo de boliana blanca usando EcoCrop..... 66

Figura 37: Sensibilidad a la reclasificación de los resultados de MaxEnt..... 67

Predicción y evaluación del impacto del cambio climático sobre los sistemas agroforestales en la amazonia peruana y andina ecuatoriana

1. Resumen

El proyecto “*Predicción y evaluación del impacto del cambio climático sobre los sistemas agroforestales en la amazonia peruana y andina ecuatoriana*” se planteo con la finalidad de contar con una herramienta metodológica que use información bioclimática actual y futura para evaluar el impacto del cambio climático en la distribución de las principales especies usadas en sistemas agroforestales en la cueca del río Aguaytía en Pucallpa, Perú, y la microcuenca del río Chimboraso en Ecuador¹, y que al mismo tiempo nos facilite el diálogo con tomadores de decisión para generar políticas públicas y privadas sobre adaptación al cambio climático.

Se utilizó el programa de nicho ecológico Maxent para modelar la distribución actual y futura (horizonte 2020 y 2050) de las especies boliana blanca (*Guazuma crinita*), capirona (*Collecophyllum spruceanum*) y cacao (*Theobroma cacao*) previamente seleccionadas como las de mayor importancia en los sistemas agroforestales en la cuenca. La información bioclimática actual proviene de la base de datos de WorldClim, mientras que los datos futuros provienen de los modelos de circulación global HADCM3 (británico) y CCMA-CCGCM2 (canadiense) y el escenario de emisiones de gases de efecto invernadero A2a.

Los resultados demuestran que el cambio climático impactará las especies agroforestales alterando sus distribución actual conforme nos acercamos a mediados de siglo. En términos generales habrá un desplazamiento de las zonas con condiciones climáticas favorables para el desarrollo de bolaina y capirona hacia las cercanías de la localidad de Aguaytía (160 km de Pucallpa). Tomando en consideración la climatología actual, la cuenca del río Aguaytía tiene 49.8% y 39.5% de su superficie con condiciones favorables (porcentaje de adecuación mayor a 50%) para el desarrollo de bolaina y capirona respectivamente, mientras que para el 2050, 42.8% y solo 6% mostraran condiciones favorables para ambas especies.

Para el cacao se hicieron dos corridas de Maxent. La primera fue para parcelas comerciales de alto rendimiento evaluadas por el instituto de cultivos tropicales (fuera de la cuenca) y la segunda fue para parcelas de cacao comercial ubicadas en la cuenca del río Aguaytía. En el primer caso no se encontró condiciones favorables para el cacao dentro de la cuenca. La segunda corrida muestra que a mediados de siglo las condiciones favorables para el cacao se incrementaran. El caso de cacao debe ser tomado con mucho cuidado debido a que se trata de parcelas comerciales sembradas muchas veces fuera de su hábitad producto de programas de promoción cultivo en la región.

¹ En este documento se reporta la investigación a cargo del IIAP en la cuenca del río Aguaytía en la amazonia peruana.

Es necesario incorporar otros factores en el proceso de modelación de distribución y es necesario reconocer que la modelación tiene limitaciones y depende de la calidad de información con la que se alimente a los modelos.

2. Introducción

Cada vez hay mayores evidencias y un reconocimiento internacional sobre el cambio climático y el impacto que este tendrá en la estructura, composición y funcionamiento de los ecosistemas terrestres, afectando la capacidad de estos de proveer bienes que son de importancia para diversos sectores socioeconómicos locales, regionales y nacionales, especialmente de aquellos cuyas estrategias de medios de vida está estrechamente relaciona a los bosques tropicales, así como de servicios a nivel local y global.

El desarrollo de la actividad agroforestal depende de ciertos criterios técnicos que incluyen una selección de especies que pueden desarrollarse bajo condiciones ambientales predominantes en la zona, y que al mismo tiempo puedan convivir entre ellas y hacer un uso eficiente del espacio y procesos como reciclajes de nutrientes, entre otros aspecto. Si bien es cierto que los sistemas agroforestales proveen servicios ecosistémicos de importancia en el contexto de mitigación y adaptación al cambio climático, estos también se verán afectados, en la medida que las especies que los componen sean impactadas por alteraciones en las variables climáticas como consecuencia del acelerado calentamiento global. El cambio en las condiciones futuras de temperatura y régimen de precipitaciones se constituirá en un reto adicional, tanto para productores como investigadores, a la selección de especies o de componentes para un sistema agroforestal y de zonas adecuados para el desarrollo de esta actividad.

Predecir la distribución potencial actual y futura de las especies se ha hecho principalmente a través de modelos bioclimáticos que asumen que el clima es el factor que limita la distribución. Existe una tendencia creciente hacia temas relacionados a la predicción de los impactos del cambio climático sobre la abundancia y la distribución de las especies; así como las interacciones entre organismos al interior de los ecosistemas y entre ecosistemas, sin embargo hay poca experiencia práctica de cómo adaptar los sistemas frente al cambio con base en los resultados de las predicciones.

La evaluación de los posibles impactos del cambio climático sobre las especies usadas en sistemas agroforestales es un paso importante para tomar decisiones sobre futuras acciones con el fin de minimizar los impactos negativos del cambio climático y tomar ventaja de aquellos positivos. En tal sentido es importante contar con herramientas que nos permita evaluar de manera confiable como la distribución potencial actual y futura de las especies que componen los sistemas agroforestales se verán impactadas por el cambio climático.

2.1 Objetivo

El cambio climático tendrá impactos en la composición, estructura y funcionamientos de los ecosistemas naturales, así como en la distribución de natural de las especies. Este proceso tendrá repercusiones en sectores vinculados a la producción primaria, tales como la agroforestería. En este contexto, el estudio busca

Desarrollar una metodología que haga uso de sistemas de información geográfica (SIG) para estudiar el impacto del cambio climático sobre las principales especies usadas en sistemas agroforestales en la región.

El proyecto pretende contribuir con las siguientes actividades específicas:

- Proveer herramientas para la selección de áreas potenciales, sistemas y componentes agroforestales;
- Fortalecer los procesos de planificación y manejo de los sistemas agroforestales;
- Facilitar la elaboración de políticas, programas y proyectos orientados al desarrollo agroforestal a través de la socialización de resultados del estudio con actores claves a nivel regional.

2.2 Antecedentes del proyecto

A mediados del año del 2008, el consorcio formado por el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) de España, el Centro de Investigación Forestal Internacional (CIFOR) en Indonesia, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) de Costa Rica, La Universidad Politécnica de Madrid (UPM) de España y Centros de Investigación del Sistema de los INIA de Iberoamérica; a través del proyecto cooperativo sobre Mitigación y Adaptación al Cambio Climático en la Gestión Forestal Sostenible en Iberoamérica (MIA) lanzaron la convocatoria para propuestas de proyectos de investigación denominada “Fondo de apoyo a proyectos de investigación en mitigación y adaptación al cambio climático en la gestión forestal sostenible”. El financiamiento haciende a un monto máximo de 40.000 euros no reembolsables por proyecto seleccionado.

La propuesta “Predicción y evaluación del impacto del cambio climático sobre los sistemas agroforestales en la amazonia peruana y andina ecuatoriana” nace de la iniciativa de tres instituciones líderes en investigación de la región amazónica en su afán de contribuir al entendimiento de los posibles impactos del cambio climático sobre los ecosistemas agroforestales, de tal manera se puedan plantear programas de adaptación y conservar el flujo de servicios ecosistémicos que estos proveen a las sociedades.

3. Marco teórico

3.1 Sistemas agroforestales

Aunque existen muchas definiciones para lo que es un sistema agroforestal, en el sentido más amplio lo podremos definir como un conjunto de elementos (vegetales como árboles, arbustos, cultivos, coberturas entre otras o animales como ganado, insectos entre otros) interactuando en un mismo sitio, con el objetivo de aumentar la sostenibilidad, diversificar el riesgo y aumentar el bienestar humano. La implementación del sistema agroforestal tiene que ser cultural, es decir producto de las acciones humanas y por lo menos uno de los elementos vegetales debe ser un vegetal leñoso. La interacción entre los elementos vegetales puede darse alternadamente en el tiempo o simultáneamente. En el sentido más amplio un sistema agroforestal es un sistema agrícola donde uno de los componentes es un árbol, es decir agricultura con árboles.

3.2 Variabilidad climática y cambio climático

El clima es probablemente el factor más importante e influyentes en los patrones de vegetación global y un impacto significativo sobre la distribución, estructura y ecología de los paisajes forestales (Kirschbaum et al. 1995, Easterling et al. 2000). La escala temporal es la que determinará el escenario bajo el cual se realizan los análisis, es decir variabilidad climática o cambio climático. Cuando la escala de análisis es el corto plazo, entonces se está hablando de variabilidad de eventos climáticos y si la escala temporal es a largo plazo con cambios significativos en los patrones climáticos, estamos entonces frente a un proceso de cambio climático.

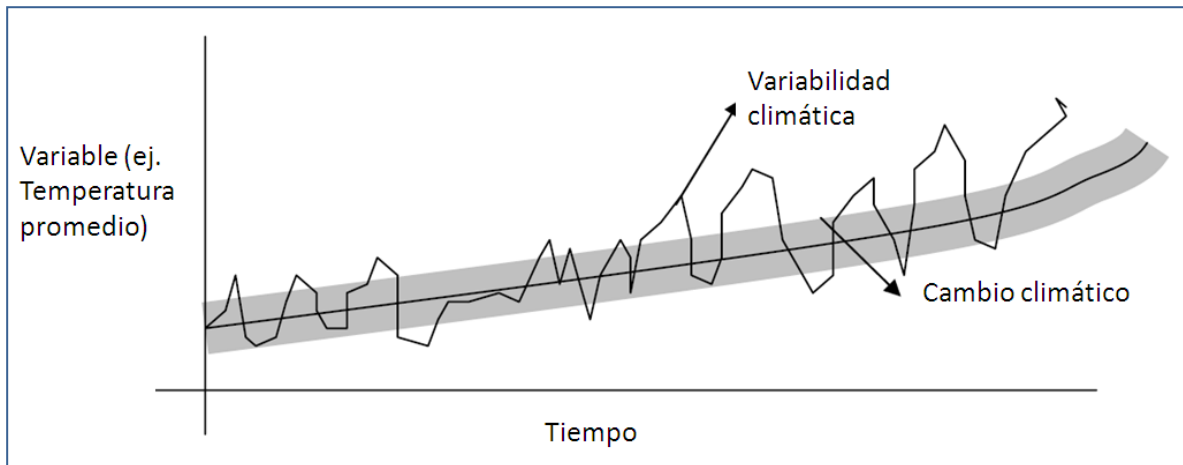


Figura 1: Variabilidad climática y cambio climático

La variabilidad climática se refiere a la variación en las desviaciones de los valores promedios o los cambios en la frecuencia e intensidad de los eventos extremos, que no necesariamente implica una tendencia. La variabilidad es asociada con la probabilidad en la distribución de

eventos picos, tales como la ocurrencia de valores máximos y mínimos de variables climáticas. Como ejemplos podemos citar al fenómeno de El Niño y La Niña (Robledo y Forner 2005).

El cambio climático está alterando el comportamiento de parámetros y eventos climáticos como las precipitaciones, temperatura, humedad, olas de sequía y al mismo tiempo impactando a diferentes sistemas en el planeta (Alley et al. 2005, Robledo y Forner 2005). El comportamiento de los diferentes parámetros climáticos será influenciado de dos maneras: Primero, habrá cambios graduales en el promedio de los parámetros climáticos tales como precipitación anual o temperatura. Segundo, se incrementarán la frecuencia e intensidad de los eventos climáticos extremos (Mirza 2003). El cambio climático está afectando la distribución de especies y el funcionamiento de los ecosistemas a nivel mundial (Thiller et al 2006).

3.3 Cambio climático y sistemas agroforestales.

Existe una creciente literatura referente a los impactos del cambio climático sobre la abundancia y la distribución de las especies; así como las interacciones entre organismos al interior de los ecosistemas y entre ecosistemas; sin embargo hay poca experiencia sobre el cambio climático en sistemas agroforestales (Hansen *et al* 2001, IPCC 2007, Parmesan 2006). Hansen *et al.* (2001) reconocen la relación entre clima y uso del suelo sobre la biodiversidad y concluyen que todos los sistemas ecológicos son dinámicos y que si bien es cierto que variaciones en el clima, perturbaciones y otros procesos ecológicos son requeridos para mantener algunas especies y comunidades, el cambio en la biodiversidad en la última década ha sido muy acelerado debido a cambios en el uso del suelo y posiblemente al cambio climático inducido por la actividad humana. Existe incertidumbre en cuanto a la magnitud de los efectos del cambio climático, sin embargo estos están ocurriendo de manera acelerada, en comparación con los plazos requeridos para la adaptación de las especies. Este hecho repercutirá en un acelerado cambio en el rango de especies, extinción y desequilibrio de la dinámica de los ecosistemas (Hansen *et al.* 2001).

Se espera que el cambio climático altere la producción a nivel local, regional y mundial de productos y servicios de los ecosistemas forestales (incluye a los sistemas agroforestales), la distribución de las especies, los mercados de madera, y las ventajas competitivas y desventajas referentes a otros cultivos (Halpin *et al.* 1995ab, FAO 2006ab, IPCC 2007). Fearnside (1999) argumenta que la variación en precipitaciones y la necesidad de cumplir los compromisos internos y de exportación de productos finales en Brasil motivarán una notable expansión de las áreas de plantaciones forestales y sistemas agroforestales hacia zonas inadecuadas para dicha actividad.

Los cambios medioambientales afectarán las especies forestales en diferentes maneras. Algunas especies tendrán rangos reducidos, mientras que otras especies podrían expandir sus rangos de distribución; mientras otras pueden extinguirse especialmente si los cambios continúan por periodos prolongados o si el cambio en el medio ambiente es demasiado rápido para que las especies puedan adaptarse (McLaughlin 2002, Rehfeldt *et al.* 2002, Jensen 2003, Hamrick 2004).

Macias *et al.* (2006) y Andreu *et al.* (2007) mencionan que especies que están ubicadas al límite de su distribución geográfica aportan información valiosa respecto a la respuesta del crecimiento del árbol al calentamiento global a través de gradientes climáticas. Estos autores usaron información dendroclimática extraída de una población de *Abies alba* y pinos ubicada en la península ibérica para analizar el impacto de las sequías de verano sobre estas especies. La cronología de los anillos de crecimiento revela que la variabilidad en el crecimiento interanual se ha incrementado marcadamente durante el último siglo. El clima, factor limitante para la formación de los anillos, ha evolucionado hacia más variabilidad de precipitaciones y más olas de calor en la segunda mitad del siglo XX.

Evidencia científica demuestra que los rangos geográficos de distribución de las especies arbóreas se han expandido y contraído como respuesta a los cambios ambientales ocurridos durante la historia evolutiva de la tierra (Hamrick 2004). Durante la década pasada se ha puesto mucha atención a los efectos que tendrán los cambios ambientales sobre las especies arbóreas debido al acelerado cambio climático (Davis y Zabiniski 1992, Alig *et al* 2002).

3.4 Vulnerabilidad

La vulnerabilidad de un sistema está en función de su sensibilidad a los cambios del clima (el grado en que un sistema responderá a determinado cambio del clima, incluidos los efectos beneficiosos y perjudiciales) y de su capacidad para adaptarse a dichos cambios (el grado en que los ajustes introducidos en las prácticas, procesos o estructuras pueden moderar o contrarrestar los posibles daños o beneficiarse de las oportunidades creadas, por efecto de determinado cambio del clima) (IPCC 2001, Adger *et al.* 2003).

Vulnerabilidad = Sensibilidad – (Adaptabilidad autónoma + Adaptación planeada)

La evaluación de la vulnerabilidad de un subsector específico como el de las plantaciones forestales es muy compleja ya que demanda de un enfoque holístico en su análisis, mientras se va generando información útil para dicho sector (Robledo y Forner 2005). Además la mayor parte de los trabajos realizados no exploran de manera específica los factores que determinan la vulnerabilidad de una especie y se enfocan en estimar impactos sobre la diversidad y distribución de una especie basados en proyecciones de cambio climático y requerimientos edafoclimáticos de una especie (Bakkenes *et al.* 2002, Miles 2004, Beaumont *et al.* 2005, Thuiller *et al.* 2006).

La vulnerabilidad de las especies forestales se debe analizar a corto y a largo plazo y esto tiene que ver con la definición de variabilidad climática y cambio climático. A corto plazo eventos extremos como huracanes, olas de sequías, fuertes precipitaciones afectarán los ecosistemas (Robledo y Forner 2005), por ejemplo, el huracán Iván del 2004 afectó extensas áreas de plantaciones forestales en Estados Unidos ocasionando pérdidas para el sector de cientos de millones de dólares. Aparte de estos efectos directos, las inundaciones y las tormentas también pueden modificar las corrientes de agua de las que dependen los árboles y dañar la salud de los ecosistemas forestales. Si bien los incendios forestales casi siempre son producidos por el hombre, su frecuencia cada vez mayor puede obedecer al aumento de las temperaturas y a la

modificación de los vientos debido al cambio climático. En algunas regiones la sequía parece claramente asociada a la frecuencia e intensidad de los incendios. En Portugal y España, en el 2003, se incendiaron casi 400 000 y 100 000 hectáreas de bosque respectivamente durante una ola de calor en un tórrido verano. Las sequías pueden ocasionar la pérdida de árboles inmaduros y volver susceptibles a insectos y enfermedades en árboles maduros (Hanson y Weltzin 2002).

Cuadro 1: Sensibilidad, capacidad adaptativa y vulnerabilidad al cambio climático

Sensibilidad, capacidad de adaptación y vulnerabilidad al cambio climático
<p><i>Sensibilidad</i> es el grado por el que está afectado un sistema, en sentido perjudicial o en sentido beneficioso, por razón de estímulos relacionados con el clima. Los estímulos relacionados con el clima abarcan todos los elementos del cambio climático, incluido el promedio de características del clima, la variabilidad del clima y la frecuencia y magnitud de casos extremos. El efecto puede ser directo (por ejemplo un cambio del rendimiento de cosechas en respuesta a un cambio del valor medio de la amplitud o de la variabilidad de la temperatura) o indirecto (p. ej., daños causados por un aumento de la frecuencia de inundaciones en la costa por razón de una subida del nivel del mar).</p>
<p><i>Capacidad de adaptación</i> es la habilidad de un sistema de ajustarse al cambio climático (incluida la variabilidad del clima y sus extremos) para moderar daños posibles, aprovecharse de oportunidades o enfrentarse a las consecuencias.</p>
<p><i>Vulnerabilidad</i> es el grado por el cual un sistema es susceptible o incapaz de enfrentarse a efectos adversos del cambio climático, incluidas la variabilidad y los extremos del clima. La vulnerabilidad es función del carácter, magnitud y rapidez del cambio climático y de la variación a la que un sistema está expuesto, de su sensibilidad y de su capacidad de adaptación.</p>
<p><i>IPCC 2001. Tercer informe de evaluación.</i></p>

A largo plazo, la distribución de las especies evidencia el grado de vulnerabilidad a los cambios que han venido ocurriendo así como los que vendrán a futuro (Hamrick 2004, Permesan 2006). Miles *et al.* (2004) mencionan que especies con amplio rango de distribución son las más resistentes a las variaciones en las precipitaciones y estacionalidad, mientras que las de limitada distribución son las más vulnerables en la cuenca del río Amazonas.

Los procesos de adaptación planificada se enfocan a reducir la sensibilidad del sistema, modificar la exposición a los efectos del cambio y reforzar la capacidad de recuperarse después del proceso de perturbación (Adger *et al.* 2005). Manejo silvicultural de las plantaciones, así como mejoramiento genético a través de la selección de ecotipos con mayores rangos de tolerancia a la variabilidad climática son algunos de los métodos más usados para mejorar la capacidad adaptativa de las plantaciones forestales (Hamrick 2004, Robledo y Forner 2005). La adaptación autónoma está relacionada a factores fisiológicos y genéticos de la especie tales como la capacidad de diseminar semillas, longevidad, plasticidad fenotípica, rangos de distribución, entre otras características, son de vital importancia para la adaptación de las

especies forestales a los impactos de la variabilidad climática y cambio climático (Hamrick 2004).

Cuadro 2: Evaluación de la vulnerabilidad del sector forestal

<p>Evaluación de la vulnerabilidad</p> <p>La valoración de la vulnerabilidad de un ecosistema es un proceso complejo que mientras debe mantener un enfoque holístico debe generar información útil a nivel sectorial. En el caso específico de la valoración de los ecosistemas forestales y el sector forestal es necesario identificar tres tipos de impactos: directos, indirectos y los incrementales.</p> <p><i>Impactos directos</i> son aquellos que tienen efectos directos sobre los ecosistemas forestales de acuerdo a cambios en el sistema climático, especialmente la temperatura y la precipitación y el incremento de eventos extremos (sequías, tornados y lluvias torrenciales). Los impactos directos pueden dividirse en impactos a nivel de metabolismo y la fisiología, los impactos a nivel de ecosistema.</p> <p><i>Impactos indirectos</i> están referidos al desarrollo del sector forestal, incluyendo impacto sobre las comunidades que dependen de los ecosistemas forestales (ej. El sector de la industria maderera y la cadena de producción que depende de la disponibilidad y calidad de la madera). En este caso el análisis se basa en la manera en la cual el sector puede ser afectado como resultado de impactos directos en las funciones ecosistémicas).</p> <p><i>Impactos incrementales</i> en un contexto específico de cambio climático se refieren al incremento en la vulnerabilidad debido al manejo insostenible de un recurso. Un ecosistema degradado tiene pocas posibilidades de responder o por lo menos resistir sequías o lluvias torrenciales.</p> <p><i>Robledo y Forner 2005.</i></p>

3.5 La zonificación edafoclimática como herramienta de selección de sitios y toma de decisión

El éxito productivo de un sistema depende, entre otros factores (ej. socioeconómicos), que las condiciones ambientales locales satisfagan sus necesidades. Cuando se desarrolla una actividad productiva sin considerar las demandas edafoclimáticas intrínsecas a la ecología de las especies, tanto el crecimiento como la productividad del sistema se ven afectados de forma negativa, resultando en un desarrollo inapropiado de la especie. Además, cuando las áreas son utilizadas con objetivos diferentes de sus aptitudes naturales, el resultado son suelos que van perdiendo su productividad y que empiezan a presentar niveles de degradación o erosión (García *et al.* 2000).

Partiendo de las demandas climáticas y edáficas de una especie, es posible elaborar un mapa de aptitud, o zonificación edafoclimática de una especie. La zonificación representa una herramienta importante para la selección de zonas idóneas para desarrollar actividades productivas con sistemas agroforestales, y son un soporte técnico en la planificación de un adecuado manejo agrosilvicultural.

En los últimos años, con la mayor confiabilidad y acceso a los resultados de los GCM, técnicos e investigadores vienen desarrollando zonificaciones basados en proyecciones del clima a

futuro y su uso está siendo cada vez más difundido y abarca desde cultivos anuales y plantaciones forestales.

Para la elaboración y análisis de estos mapas, se utilizan, además de las demandas edafoclimáticas, las proyecciones futuras referentes a los potenciales cambios en la distribución del régimen de precipitación, duración de sequías, temperaturas y comportamiento de plagas y enfermedad. Aspectos relacionados a la plasticidad de la especie también son considerados en la sesión II.3.

Para entender como un mapa de aptitud edafoclimática es construido debemos primero entender sobre como los factores ambientales pueden limitar, y hasta impedir el desarrollo de las especies, implicando en la forma como estas se distribuyen. Estas limitaciones son explicadas por la Ley del Mínimo de Liebig y de la Tolerancia de las especies.

Cuadro 3: La distribución de especies según la Leyes del Mínimo y de la Tolerancia

La distribución de especies según la Leyes del Mínimo y de la Tolerancia

Para que la vida de un organismo sea posible, todos los factores ambientales necesarios para su sobrevivencia deben estar presentes. Esta máxima parte de Justus Liebig en el siglo XIX para establecer la famosa la **Ley del Mínimo de Liebig**, retomada por Bartholomew en 1958, como **Ley de los Factores Limitantes**. Según estas, no es suficiente para una planta tener a su disposición en abundancia la gran mayoría de los elementos básicos (ex. agua, algún nutriente), si existir la ausencia de un elemento indispensable para su desarrollo. Sin embargo, no se trata únicamente de la presencia o ausencia de un elemento. Según la **Ley de la Tolerancia** propuesta por Shelford a inicios del siglo XX, cada especie posee una amplitud² de tolerancia (con límites mínimos e máximos) a los factores ambientales, cuales posibilitan su existencia. Siendo que, las especies pueden tener una larga amplitud de tolerancia para un factor ambiental limitante, y estrecha para otro factor³. Siendo que, los organismos con larga amplitud de tolerancia para todos los factores son los que tienen mayores posibilidades de una amplia distribución.

² El intervalo de tolerancia de una especie respecto a un factor del ambiente es denominado de **valencia ecológica**. Esta es diferenciada por dos tipos diferentes de especies: las **eurioicas** y las **estenoicas**. Para saber más consultar Anexo 10.

³ El período reproductivo es crítico y durante el cual es más probable que los factores ambientales sean limitantes, o sea, los límites de tolerancia son más estrechos en esta etapa.

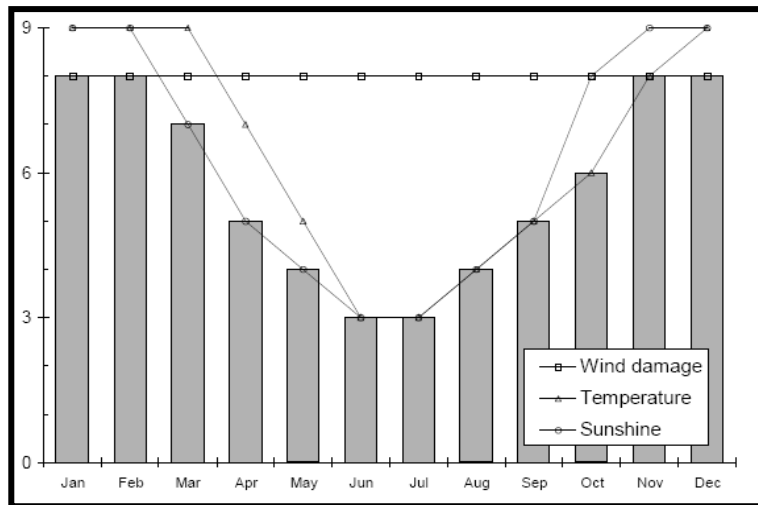


Figura 2: Factores limitantes para *P. radiata*. Notar que la especie nunca alcanza su potencial óptimo porque al menos un factor es siempre limitante (ej. El viento). Fuente: Hackett y Vanclay (1998).

De forma resumida, para la construcción de un mapa de aptitud edafoclimática, básicamente se requiere (1) **determinar cuáles son los factores ambientales o requerimientos edafoclimáticos de mayor relevancia en el desarrollo de una especie**. Sin embargo, debido a la insuficiente información sobre estas demandas, principalmente para especies que no tienen un historial de domesticación y que además no se conoce su distribución y dispersión geográfica, se plantea suplir esta deficiencia a través de (2) una **simulación de la distribución de especies**, con base en la información de la condición del sitio de algunos individuos (georeferenciados) de la especie, y sobre esta determinar las demandas edafoclimática. Para presentar de forma más clara los resultados, donde los usuarios pueden tener un mejor comprensión, se (3) **determina y presenta las zonas de los límites edafoclimáticos**. El análisis se realiza teniendo en consideración (4) las **estrategias adaptativas** de las especies. A seguir, se presentan las implicaciones de cada etapa del procedimiento descrito.

3.6 Métodos para evaluar el impacto del cambio climático

Muchos estudios de vegetación y clima han mostrado que ciertos regímenes climáticos están asociados con comunidades particulares de plantas y tipos de funciones (Holdridge 1947, Thornthwaite 1948). A finales de la década de los 50, la FAO publicó un compendio con todas las metodologías conocidas en esa entonces para seleccionar especies para plantaciones forestales, concluyendo que es la combinación del régimen de lluvias, especialmente su distribución y la duración de la estación seca, y el régimen de temperaturas, los que determina qué especies crecen o pueden crecer en una zona. Además, se agregan las modificaciones que pueda introducir el suelo y particularmente su capacidad para retener agua. Estos factores permiten construir mapas de zonas bioclimáticos y listas de especies recomendadas (Booth y Jovanovic 2002).

El avance tecnológico permitió el diseño de programas que facilitan la selección de especies para plantaciones forestales de una manera más amigable (Webb *et al.* 1980, Webb *et al.* 1984). Sin embargo; hubo inconvenientes con la obtención de datos climáticos, debido a la ausencia de estaciones cerca de las zonas de plantaciones o parcelas experimentales (Booth y Jovanovic 2002). Actualmente se cuenta con modelos que permiten hacer interpolaciones climáticas con una aceptable precisión basados en mapas de elevación digital, que están siendo usados para identificar áreas climática y edáficamente apropiadas para el establecimiento de plantaciones forestales (Booth y Jovanovic 2002, Paul *et al.* 2007).

Muchos trabajos se han desarrollado en África, Australia y el Sudeste asiático (Zuo *et al.* 1996, Paul, *et al.* 2007, Booth y Jovanovic 2002). Algunos autores han evaluado el impacto del clima y los eventos climáticos sobre plantaciones forestales en el tiempo a través de la construcción de cronologías con base en los anillos de crecimiento de las especies y las han comparado con registros históricos de clima en la región (Macias *et al.* 2006, Andreu *et al.* 2007). Otros comparan los requerimientos edafoclimáticos de una o varias especies con las condiciones de suelo y clima presentes en una zona para evaluar la performance de una especie a diferentes condiciones medio ambientales (Fryer 1996). Otras metodologías combinan escenarios de cambio climático generados por modelos de circulación global (GCM por sus siglas en inglés) y modelos como BIOME4, BIOCLIM o BIOMOD, que incluyen el resultado de los GCM como insumos para evaluar el impacto del cambio climático sobre la distribución de especies, composición y funcionamiento de ecosistemas forestales (Bakkenes *et al.* 2002, Miles 2004, Beaumont *et al.* 2005, Thuiller *et al.* 2006).

Miles (2004) evaluó las tendencias de distribución de 69 especies de angiospermas como respuesta al cambio climático en la cuenca amazónica. Se escogió el modelo HADCM2 de la oficina de meteorología del Reino Unido por que era el GCM que mejor se ajustaba a las precipitaciones actuales en Sur América. La distribución potencial de la especie en una celda fue modelada usando índices de adecuación basados en variables bioclimáticas. La distribución encontrada fue adicionalmente limitada por contigüidad espacial y proximidad a lugares conocidos. Los resultados mostraron que 43% de todas las especies se volverán no viables para el 2095 debido a que su potencial de distribución ha cambiado drásticamente, pero hubo pocos cambios en la distribución encontrada de muchas especies debido al retraso en la respuesta de la población. Especies con amplio rango de distribución y amplia tolerancia a variaciones ambientales exhibieron las menores repuestas al cambio climático. Mientras que especies con rangos menores de distribución y tiempos generacionales menores fueron las más impactadas.

Bakkenes *et al.* (2002) construyeron un modelo llamado “Euromove” para evaluar el impacto de las proyecciones de cambio climático al 2050 sobre diversidad de especies de plantas mayores y su distribución en Europa. Los resultados fueron que 32% de las especies presentes en 1990 desaparecerán a finales del 2050.

Actualmente los modelos de nichos ecológicos están siendo cada vez más usados para la predicción de la distribución potencial actual y futura de especies (Van Zonneveld *et al.* 2009), entre ellos, el programa Maxent (Phillips *et al.* 2006, Phillips y Dudik 2008) es uno que

frecuentemente se encuentra citado en la literatura relacionada al modelaje de la distribución de especies.

3.6.1 Descripción de Maxent

Maxent es un programa que permite modelar la distribución geográfica de las especies con base en la máxima entropía, desarrollado por Steven Phillips, Miro Dudik y Rob Schapire, con el apoyo de los laboratorios de investigación de AT&T, la Universidad de Princeton y el Centro para la Biodiversidad y Conservación del Museo Americano de Historia Natural (Phillips *et al.* 2006).

Maxent pertenece a la categoría de modelos de nicho climático, el cual calcula la distribución de máxima entropía para una especie dentro de un área determinada, tipificada por valores climáticos observados en el sector o zona en la que se reportó la presencia de las especies en estudio, y como resultado produce un mapa de nicho climático que consiste en los valores de probabilidad para hábitats naturales adecuados (Phillips *et al.* 2006). Maxent fue introducido a este grupo de modelos en años recientes y a demostrado su performance comparado con otros métodos similares (Elith *et al.* 2006, Graham y Hijmans 2006). De manera práctica, los insumos necesarios para correr el programa son un set de datos conteniendo el nombre de la especie y las coordenadas (longitud y latitud) de los sitios de colecta, y otro set de datos conteniendo las variables climatológicas que contengan las zonas en las cuales se hicieron las colectas.

La exactitud de los nichos climáticos que predicen la distribución natural de las especies considerando la climatología actual se somete a análisis estadísticos mediante el área bajo la curva (AUC, por sus siglas en inglés) de la curva operada por el receptor (ROC, por sus siglas en inglés). La construcción de la curva ROC es un proceso repetitivo aplicado a cada umbral de idoneidad del modelo: el modelo de distribución se reclasifica en dos categorías a partir del umbral, para obtener un modelo binario, en el que los valores del modelo original inferiores al umbral indican ausencia y los valores iguales o superiores al umbral indican presencia (Benito y Peñas 2007). Sin embargo, Maxent usa solo datos de presencia y no de ausencia. El área bajo la curva ROC (AUC) indica, para un punto de presencia y uno aleatorio seleccionados al azar, la probabilidad de que el valor de idoneidad previsto por el modelo para el punto de presencia sea mayor que el previsto para el punto aleatorio. Una medida directa de la capacidad de discriminación del modelo, que toma valores próximos a 1 cuando existe un buen ajuste con los datos de evaluación, y cercanos a 0.5 cuando el ajuste no es mejor que el obtenido por azar (leer a Phillips *et al.* 2006; Phillips y Dudik 2008 para una mejor explicación más detallada del AUC).

4. Metodología.

4.1 Descripción de la zona de estudio

El área de estudio, comprende una extensión de 1762,086 ha que representa el 17.21% de la superficie total de la Región Ucayali (IIAP 2002). Presenta un paisaje montañoso en el lado occidental, mientras que en el lado oriental, el relieve es predominantemente plano. Desde la década de 1940, como consecuencia de la construcción de la carretera Federico Basadre, el área de estudio se constituye en el eje central de ocupación de la Amazonia peruana, cuyos resultados más relevantes son el crecimiento vertiginoso de la ciudad de Pucallpa y la deforestación de extensas áreas adyacentes a la carretera principal y vías secundarias.

Pucallpa es un sitio de investigación ideal para desarrollar investigación en los márgenes de bosques por tres razones. a) Por sus características bio-físicas (e.g. lluvia y suelos) que son similares a otros sitios de la Amazonía, como el occidente del Brasil- Acre (IICA 1995). Por lo tanto, los resultados de las investigaciones pueden ser aplicados y comparados en una extensión geográfica mayor. b) aproximadamente con 50 años de deforestación y una población creciente se ha dado en una área relativamente pequeña (2% de la Amazonía Peruana) que mantiene usos de la tierra muy diversos. c) como Pucallpa ha sido habitado antes que otras zonas de la Amazonía, los patrones del cambio del uso de la tierra pueden ser considerados como una trayectoria probable que otras áreas pueden replicar en el futuro. Se estima que el 10% de la Amazonía Peruana (10 millones de has está deforestada y el 25% de la región alrededor de Pucallpa ha sido convertido para usos agrícolas (IIAP y CTAR Ucayali 2000).

El ámbito de estudio se encuentra en la región occidental de la cuenca amazónica peruana. Actualmente cuenta con una población de 354,340 habitantes, que representa el 82% del total del departamento y algo más del 10% de la población de la Amazonía peruana (IIAP y CTAR Ucayali 2000).

La precipitación total promedio es aproximadamente 1700 mm con un patrón de lluvia bimodal de meses húmedos de febrero a mayo y de octubre a diciembre, y meses secos de mayo a septiembre y enero (White 2005). La temperatura media anual es 25 ° C. Como en muchas regiones tropicales húmedas, las restricciones de fertilidad del suelo son el factor más importante que afecta la producción de los sistemas agrícolas de *terra firme*. Las malezas invasoras son otro factor (de Rouw 1995, Fujisaka *et al.* 2000). Las restricciones básicas del suelo son la baja capacidad de intercambio catiónico, acidez del suelo, alta saturación de aluminio y baja existencia de nutrientes (particularmente fósforo, nitrógeno y calcio). Los suelos de las áreas de bosque bien drenados son ácidos (pH 4.4) y tienen bajo contenido de P (2 ppm) (Loker 1993).

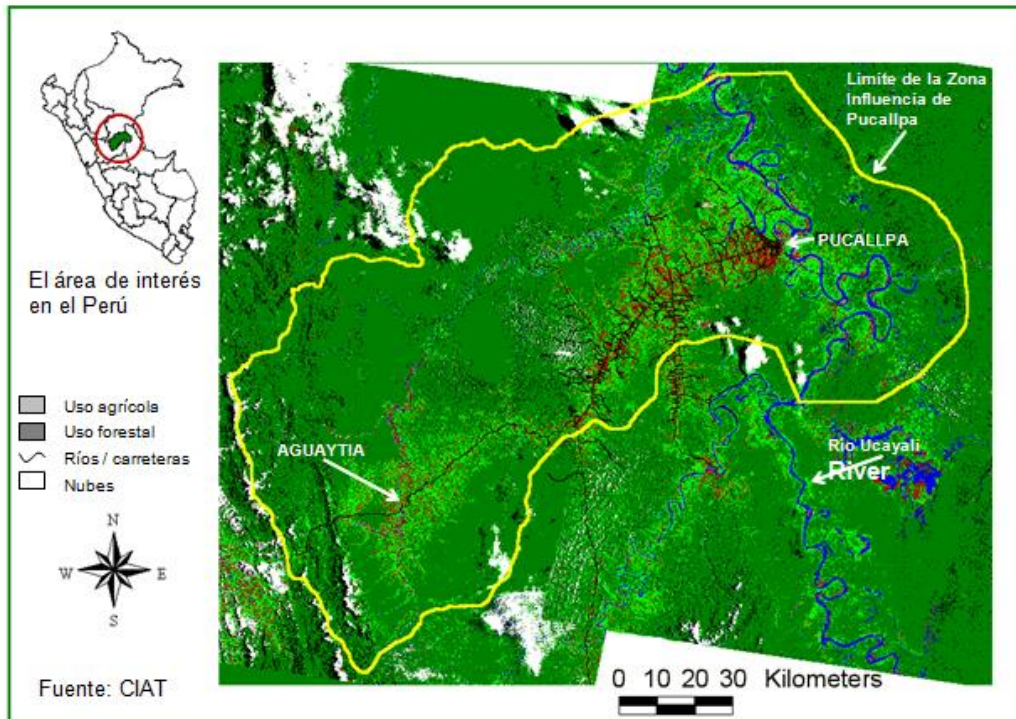


Figura 3: Cuenca del rio Aguaytía, Pucallpa-Perú

4.2 Definición de criterios para la selección de especies evaluadas

Esta actividad se basó en la sistematización de información secundaria proveniente de trabajos de investigación y promoción de sistemas agroforestales en la cuenca del rio Aguaytía. Además se toma en consideración la percepción y preferencia de los productores por el uso de determinadas especies.

Sotelo y Weber (1997) realizaron un trabajo de selección participativa de especies para su uso en sistemas agroforestales. Los agricultores seleccionaron 23 especies para el desarrollo de sistemas agroforestales en esta zona de selva baja tropical. Las especies de mayor prioridad para investigación en mejoramiento genético en sistemas agroforestales son Pijuayo (*Bactris gasipaes*), Tornillo (*Cedrelinga catenaeformis*), Guaba (*Inga edulis*), Capirona (*Calycophyllum spruceanum*) y Bolaina blanca (*Guazuma crinita*). Los productos de mayor importancia de las especies son madera, energía y alimento.

El programa de domesticación de arboles de ICRAF ha iniciado investigación en Pijuayo, Guaba, Capirona y Bolaina blanca. Adicionalmente, esta misma institución dentro del proyecto Desarrollo Participativo Amazónico (DEPAM), inicio el establecimiento de sistemas agroforestales con base en las especies de mayor interés por parte de los productores encuestados.

De esta manera, los criterios de selección de las especies se resumen en:

- Estudio de selección participativa
- Trabajos de domesticación
- Uso en especies agroforestales
- Importancia para la economía de las región

4.3 Especies seleccionadas

4.3.1 *Bolaina Blanca (Guazuma crinita)*

La bolaina es un árbol de 25 a 80 cm. de diámetro y 15 a 30 m. de altura total, con fuste recto y cilíndrico y forma de copa globosa irregular, corteza externa lisa a finamente agrietada, color marrón claro a grisáceo, corteza interna fibrosa y conformando un tejido finamente reticulado, color amarillo claro, oxida rápidamente a marrón

Su distribución es muy amplia en el neo-tropico desde Centroamérica a la región Amazónica, hasta el sur de Brasil y Bolivia, mayormente hasta los 1,500 msnm. La bolaina, en el Perú, se encuentra en la Amazonia, en los departamentos de Amazonas, Cajamarca, Huanuco, Junín, Lambayeque, Loreto, San Martín, y Ucayali, y en la Costa Norte: (Encarnación, 1983).

La bolaina se desarrolla en zonas con una precipitación anual de 1800 a 2500 mm, temperatura media anual de 25° C (Lino, 2007), localizándose en altitudes entre 0 y 1,000 msnm, en terrenos planos y ondulados, con pendientes suaves (INIA, 1996)

En el departamento de Ucayali se le encuentra en los bosques secundarios o purmas, aledañas a la carretera Federico Basadre y en Tournavista, también formando rodales casi puros en márgenes de los ríos San Alejandro, Aguaytía, Pachitea, Ucayali y en las diferentes quebradas afluentes de estos ríos. Es una especie heliofita, característica de la vegetación secundaria temprana, muy exigente en luz, es de rápido crecimiento y alto poder de regeneración. Los suelos preferidos de la bolaina son suelos ricos, con buen drenaje, inundables temporalmente, también tolera suelos pobres con cierta deficiencia en el drenaje, pero es baja la tolerancia a la competencia. La madera de bolaina tiene diversos usos, sin embargo son más usadas en revestimiento de interiores. No es una madera de alta densidad por lo que no se usa como un componente estructural (Álvares y Rios 2007).

4.3.2 *Capirona (Calycophyllum spruceanum)*

El árbol de capirona (*Calycophyllum spruceanum*) pertenece a la familia Rubiaceae. Esta especie se caracteriza por poseer una densidad muy alta, sumamente dura y es utilizada localmente como leña y madera redonda para construcciones rurales; en Ucayali, últimamente ha sido explotada en grandes volúmenes, para su uso en pisos y carpintería (Sotelo y Weber 1997). El árbol es recto con copa heterogénea, hasta 30 m de altura, fácilmente reconocible por su tronco liso y brillante, rojizo, verduzco o grisáceo, con ritidoma coriáceo, el cual cambia anualmente (Lao, 1986). Esta especie se distribuye en toda la región tropical de Latinoamérica, entre 0-1000 msnm, desde Bolivia hasta la Amazonía brasileña y peruana, particularmente habita fértiles áreas forestales recientemente intervenidas y ocasionalmente inundadas, es una

especie gregaria a lo largo del río donde forma los bosques llamados “capironales” (Spichiger *et al.*, 1990; Brako y Zarucchi, 1993).

C. spruceanum tiene características ecológicas de pionera; la madera tiene densidad de 0.76 g/cm³, color blanco pardo, muy dura, grano recto-entrecruzado, fácil aserrío y trabajabilidad, es utilizada en pisos, tarugos, molduras y estructuras; fue explotado en grandes volúmenes en la zona de Pucallpa (Aróstegui, 1975; Toledo, 1994).

4.3.3 Cacao (*Theobroma cacao* L.)

El cacao (*Theobroma cacao* L.) pertenece a la clase Dicotiledónea, orden Malvales, familia Sterculácea, género *Theobroma* y especie cacao. El ICT precisa que existe gran diversidad de genotipos de cacao provenientes del cruce entre amazónicos, criollos y trinitarios que presentan atributos superiores. Sin embargo, su potencial se ve disminuido por un mal manejo agronómico integrado. Destaca el clon CCN-51 por su alta calidad de almendra y previene del peligro de cultivos monoclonales que se produzca una combinación de 5 clones por hectárea, sugiriendo que 75% sean de alta productividad y 25% tolerantes, dispersos al azar (IICA 2006).

El clima así como el suelo están directamente relacionados con el crecimiento, floración, fructificación y producción del cacao, e igualmente con la aparición de algunas enfermedades; es así que en la instalación de una plantación de cacao se deben considerar los requerimientos mínimos para ambos componentes. La temperatura media anual debe estar entre el 24°C a 26°C y no debe exceder los 30°C, ni ser inferior a 15°C. Así mismo, las oscilaciones diarias de temperaturas entre el día y la noche no deben ser inferiores a 9°C.

Este cultivo es muy sensible a la falta de humedad del suelo y necesita un adecuado suministro de agua para efectuar sus procesos metabólicos. La lluvia presenta grandes variaciones a través del año.

De otro lado IICA (2006) menciona que para un buen desarrollo productivo del cacao las precipitaciones deben tener una buena distribución de precipitación durante todo el año y no ser menores a 100mm/mes. En caso de zonas demasiado lluviosas deberán estar asociadas con suelos de buen drenaje.

4.4 Requerimientos edafoclimáticos de las especies estudiadas

A continuación se presentan los rangos de adecuación de las especies en estudio a variables climáticas y de suelo, las cuales fueron sometidas a consideración de expertos.

Tabla 1: Requerimientos climáticos de las especies seleccionadas para la cuenca Aguaytía, Perú

Variables climáticas		Especies		
		<i>Guazuma crinita</i>	<i>Calycophyllum spruceanum</i>	<i>Theobroma cacao</i>
Precipitación (mm/año)	Apto	1000 - 3000	1000 - 3400	800 - 5000
	Óptimo	1800 - 2500	1800 - 3000	1200 - 2500
Período Seco (n° meses/año)	Apto	2 - 4	0 - 1	< 2
	Óptimo	1 - 2	0 - 0	0
Temp. Media (°C)	Apto	18 - 36	20 - 33	20 - 40
	Óptimo	22 - 26	24 - 29	24 - 28
Altitud (msnm)	Apto	50 - 1000	0 - 1000	0 - 1200
	Óptimo	100 - 800	0 - 600	0 - 800
Variables edáficas				
Profundidad		Profundos	Profundos	Medios
Drenaje		Drenados	Bien drenados	Bien drenados
Relieve		Planos a ligeramente ondulados	Planos a ligeramente ondulados	Planos a ondulados
Textura (*)		Franco a Franco arcillosos	Franco a Franco arcillosos	Franco a Franco arcillosos
Fertilidad(*)				Media a Alta
pH(*)		7	4.5-6	5.5 a 6.5

4.5 Ubicación de las colecciones de componentes de los SAF

Para determinar la ubicación de los rodales naturales de bolaina blanca (*G. crinita*) y capirona (*C. spruceanum*) se usaron dos fuentes: La primera es el subproyecto de “silvicultura de la boliana en plantaciones y sucesiones secundarias en Ucayali” (Soudre 2007); y la segunda es el trabajo de colecta realizado por ICRAF. Estos datos corresponden a las colectas realizadas durante 1996 y 1998 en diversos sitios de la amazonia peruana. Estas colectas se hicieron con la finalidad de establecer parcelas en la cuenca del río Aguaytía para un estudio de evaluación de procedencia (ICRAF 1998).

La ubicación de las parcelas de cacao que fueron usadas en este trabajo provienen de las parcelas de productores del Programa de Desarrollo Alternativo (PDA), las parcelas de productores de la Asociación de Cacaoteros Tecnificados de Padre Abad (ACATPA) y una base de datos de colectas de parcelas de alta productividad realizado por el Instituto de Cultivos Tropicales (ICT). Adicionalmente se descargaron puntos de ubicación de parcelas de la base de datos *Global Biodiversity Information Facility* disponibles en línea en: <http://www.gbif.org/>. A continuación se detalla la ubicación de los rodales de bolaina y capirona, así como las

plantaciones comerciales de cacao que se usaron para modelar la distribución potencial de estas especies.

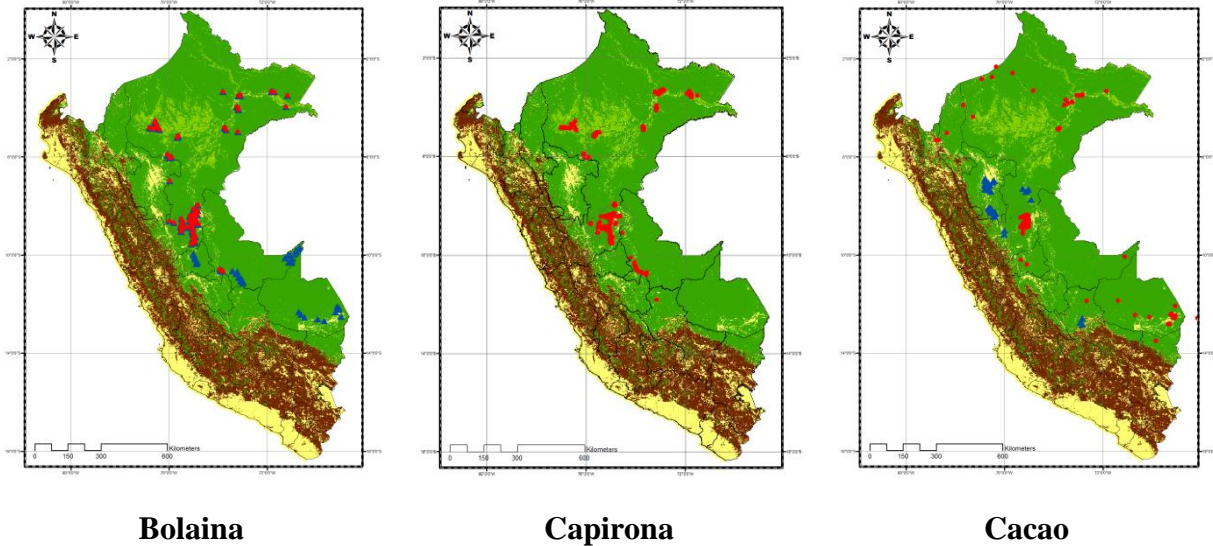


Figura 4: Ubicación de las parcelas⁴ de boliana, capirona⁵ y parcelas comerciales de cacao

4.6 Climatología actual: variables bioclimáticas

Las variables bioclimáticas que se usaran provienen de la base de datos de WorldClim (Hijmans et al. 2005). Estos consisten en promedios mensuales de la Temperatura mínima y máxima, así como la precipitación total mensual. De estas tres variables se derivan 19 variables bioclimáticas, que son el insumo para generar los mapas de distribución actual a través de modelos de nichos ecológicos, como es el caso de maxent. Estas variables están en formato grid a una resolución de 30 arc seconds (~1 km).

Las variables bioclimáticas representan tendencias anuales como son: temperatura promedio anual, precipitación anual. También se puede observar estacionalidad como rangos de temperatura y precipitación; y factores extremos o limitantes ambientales como: temperatura del mes más frío y más caliente, y la precipitación en las trimestres mas húmedos y secos. WorldClim usa los siguientes códigos para sus 19 variables bioclimáticas.

⁴ Los puntos rojos son los datos usados en las predicciones sometidas a consulta con expertos, mientras que los puntos azules son aportes del taller con expertos del 12 de marzo 2010.

⁵ Los expertos estuvieron de acuerdo con los puntos de presencia de rodales de capirona y no hubo mayores cambios.

- BIO1 = Temperatura promedio anual
- BIO2 = Rango diurno promedio (promedio mensual (temperatura máxima – temperatura mínima))
- BIO3 = Isotermalidad (P2/P7) (* 100)
- BIO4 = Temperatura estacional (desviación estándar *100)
- BIO5 = Temperatura máxima del mes más caliente
- BIO6 = Temperatura mínima del mes más frío
- BIO7 = Rango de temperatura anual (P5-P6)
- BIO8 = Temperatura promedio del trimestre más húmedo
- BIO9 = Temperatura promedio del trimestre más seco
- BIO10 = Temperatura promedio del trimestre más caliente
- BIO11 = Temperatura promedio del trimestre más frío
- BIO12 = Precipitación anual
- BIO13 = Precipitación del mes más húmedo
- BIO14 = Precipitación del mes más seco
- BIO15 = Precipitación estacional (coeficiente de variación)
- BIO16 = Precipitación en el trimestre más húmedo
- BIO17 = Precipitación en el trimestre más seco
- BIO18 = Precipitación en el trimestre más caliente
- BIO19 = Precipitación en el trimestre más frío

4.7 Datos climáticos futuros

En este trabajo se usaran los datos usados por Van Zonneveld et al. (2009) para el horizonte temporal 2050. Adicionalmente se trabajará con el horizonte 2020. En ambos casos, se usará la climatología resultado de los modelos de circulación global (CGM) HADCM3 y CCMA-CCGCM2, que fueron corridos bajo el escenario de emisiones de gases de efecto invernadero A2a.

El modelo HADCM3 fue desarrollado por el Centro Hadley para la Predicción e Investigación Climática del Reino Unido y el modelo CCMA- CCGCM2 fue desarrollado por el Centro Canadiense para el Modelaje y Análisis Climático (IPCC 2007). De otro lado el escenario A2a (Business as usual) refleja una situación de pocos cambios en emisión de gases e implementación de tecnologías limpias, es decir, se pondrá énfasis en el crecimiento económico bajo el mismo patrón de uso de los recursos naturales y uso de combustibles fósiles como se ha venido haciendo hasta ahora (IPCC 2001).

4.8 Pasos para predicciones actuales y futuras con Maxent⁶

Los modelos de distribución se construyeron con el método de Máxima Entropía, implementado en el programa MaxEnt (Phillips *et al.* 2006). Maxent es un método de cómputo evolutivo que detecta relaciones no aleatorias entre la presencia de las especies y las

⁶ Adicionalmente se prepara un manual práctico para utilizar Maxent

condiciones ambientales, usando los puntos de presencia de las especies y las capas ambientales para caracterizar los nichos ecológicos de las especies por medio de maximizar una distribución uniforme en el espacio ambiental al promedio de los valores de los datos de entrada; posteriormente, una vez construido el modelo de nicho es proyectado al espacio geográfico para producir un mapa probabilístico de distribución potencial para cada una de las especies (Phillips et al. 2004, Phillips et al. 2006).

Como se mencionó anteriormente, para la generación de los modelos de distribución de las especies se utiliza dos insumos. El primero es la ubicación georeferenciada de las especies seleccionadas, estas pueden ser colectas y/o muestras de campo o en su defecto provenir de los registros disponibles en la base de datos del Global Biodiversity Information Facility, y el segundo insumo se refiere a la información climatológica de la zona de estudio.

Luego de generar el modelo de distribución potencial o adecuación de las especies bajo la climatología actual, se adicionará el tercer insumo que corresponde a los datos de climatología futura, para reflejar cambios en la distribución de las especies bajo condiciones climáticas proyectadas a futuro. Para esto se utilizó los datos generados por dos GCM (CCMA-CGCM2 y HADCM3)⁷, bajo escenario de emisiones de gases de efecto invernadero A2a⁸ (Business as usual) y los horizontes de tiempo 2020 y 2050.

La predicción de distribución futura o adecuación de las especies estudiadas tiene como supuestos básicos:

- El cambio climático ocurre a una velocidad que no permite la adaptación autónoma de las especies a las nuevas condiciones ambientales. Esto quiere decir que todas las especies tendrán los mismos requerimientos ambientales en el presente y en el futuro;
- El modelo no toma en cuenta la adaptación inducida a través de mejoras en el manejo y labores silviculturales.
- El modelo toma como punto de partida la ubicación o presencia de los individuos como parte de la muestra de la especie en estudio. Asumiendo que la presencia de un individuo bajo condiciones naturales (las plantaciones no entran en esta definición) garantiza la adaptación del mismo a su entorno condiciones edáficas y que éstas no cambiaran a futuro, nos concentraremos exclusivamente en aquellos efectos producidos por variaciones en el clima.

La simulación tuvo finalidad de entender el comportamiento y distribución de cada especie a condiciones futuras. Analizando si las áreas de distribución se expanden o se retraen en este escenario de cambios climáticos para los años de 2020 y 2050.

⁷ El modelo HADCM3 fue desarrollado por el Centro Hadley para la Predicción e Investigación Climática del Reino Unido y el modelo CCCMA fue desarrollado por el Centro Canadiense para el Modelaje y Análisis Climático (IPCC 2007).

⁸ La selección de este escenario fue realizada porque refleja una situación de pocos cambios en emisión de gases e implementación de tecnologías limpias, es decir, se pondrá énfasis en el crecimiento económico bajo el mismo patrón de uso de los recursos naturales y uso de combustibles fósiles como se ha venido haciendo hasta ahora (IPCC 2001)

4.9 Uso de ArcGis para generar mapas

El resultado de las corridas de Maxent genera archivos de texto en formato ARC ASCII. Estos pueden ser importados en cualquier programa de SIG para construir y editar mapas según nuestro interés. En este caso se usarán ArcGis para generar los grids y ArcView para calcular las áreas.

Como el resultado de las corridas de Maxent es la probabilidad que las condiciones sean adecuadas o no, los grids serán reclasificados de la siguiente manera⁹:

Tabla 2: Reclasificación de los rangos de adecuación para bolaina, capirona y cacao

Bolaina		Capirona		Cacao	
Categoría	% adecuación	Categoría	% adecuación	Categoría	% adecuación
Marginales	0-50	Inapropiadas	0-50	Inapropiadas	0-20
Aptas	50-70	Aptas	50-90	Marginales	20-50
Óptimas	70-100	Óptimas	90-100	Aptas	50-75
				Óptimas	75-100

Para calcular las áreas por cada departamento o polígono se usarán los grids debidamente reclasificados y la herramienta “*Histogram by zone*” del menú *Analysis* de ArcView. Los resultados pueden ser exportados y trabajados en hojas de cálculo.

4.10 Validación de resultados y taller con expertos

Para poder corroborar los avances del trabajo de investigación se organizó una reunión con expertos de cuatro regiones Amazónicas (San Martín, Huánuco, Loreto y Ucayali), entre ellos especialistas en el cultivo de Cacao (15), Bolaina (10), Capirona (6), sistemas agroforestales (3), extensionistas agrarios (2), geógrafos y economistas especialistas en SIG (3), genetistas (1); y también se invitó a estudiantes universitarios (5). El objetivo de la reunión fue:

- Poner a consideración de expertos los avances en el tema de predicción del impacto del cambio climático sobre sistemas agroforestales en la región Ucayali.

Los objetivos específicos del taller fueron:

- Presentar los avances en temas de predicción del impacto del cambio climático en los sistemas agroforestales a nivel regional.
- Discutir los avances y validar los modelos predictivos generados para los sistemas agroforestales.
- Crear un espacio de discusión sobre los impactos del cambio climático en especies agroforestales en la cuenca del río Aguaytía.

⁹ La reclasificación toma en consideración el aporte de las mesas de trabajo con expertos.

- Proponer estrategias de adaptación para los sistemas agroforestales del ámbito de influencia de la cuenca del río Aguaytía.

5. Resultados

A partir del procedimiento descrito en la metodología se desarrollaron mapas de distribución para cada componente agroforestal seleccionado. Sin embargo, para la construcción de estos mapas y sus respectivos análisis no fueron considerados factores socioeconómicos que influyen en la potencial distribución de las especies (ej. distancia del mercado, costo de oportunidad de otros usos del suelo). Se espera considerar estos factores en la propuesta de continuación del proyecto.

Cabe más una vez resaltar que para la construcción y análisis de los modelos futuros de distribución, se determinó los siguientes supuestos: (1) el cambio climático ocurre a una velocidad que no permite la adaptación autónoma de las especies a las nuevas condiciones ambientales; (2) las variables edáficas se mantendrán constantes, concentrando exclusivamente en efectos producidos por variaciones en el clima. Asimismo, para la generación de los mapas no se considera la posibilidad de adaptación inducida a través de mejoras silviculturales. Sin embargo, para los análisis y proposición de arreglos agroforestales y manejo esta posibilidad es considerada.

Además de los mapas de distribución potencial de las especies seleccionadas y sus respectivos análisis, en el presente informe son presentadas las decisiones relacionadas a la construcción de estos mapas, tales como: (1) selección de los modelos globales de circulación; (2) discusión sobre la sensibilidad de MaxEnt al tamaño y la distribución de los puntos muestreados, y (3) implicaciones de la división de los rangos de aptitud de las especies.

Finalmente, se presenta una breve discusión (insumo para la segunda ronda de consulta con expertos) sobre la contribución relativa de las variables bioclimáticas sobre los modelos utilizados, un breve análisis de los principales impactos de eventos extremos sobre las especies y primeras recomendaciones de manejo agroforestal basados en estas.

5.1 Requerimientos climáticos para bolaina, capirona y cacao

A continuación se presentan unas tablas con estadísticas descriptivas referente a las condiciones bioclimáticas¹⁰ de las zonas en las cuales se realizaron las colectas de bolaina, capirona y cacao comercial tanto para parcelas comerciales de alta productividad, así como para las parcelas de PDA, ACATPA y GBIF.

¹⁰ Las variables relacionadas con temperatura están expresadas en $T^{\circ} \times 10$ para facilitar el trabajo de SIG

Tabla 3: Resumen de las variables bioclimáticas en los puntos de muestreo de bolaina

Variable	n	Media	D.E.	CV	Mín	Máy	Mediana
BIO_1 (°C*10)	636	294.75	63.83	21.65	187	592	288
BIO_2 (°C*10)	636	107.81	9.92	9.2	92	140	113
BIO_3 (%)	636	82.37	2.53	3.07	70	86	82
BIO_4 (DS)	636	455.45	98.54	21.64	322	1067	449
BIO_5 (°C*10)	636	327.12	6.24	1.91	289	337	329
BIO_6 (°C*10)	636	196.64	11.24	5.72	124	212	193
BIO_7 (°C*10)	636	130.48	14.68	11.25	109	165	138
BIO_8 (°C*10)	636	264.22	4.01	1.52	210	270	265
BIO_9 (°C*10)	636	257.01	5.41	2.1	204	266	257
BIO_10 (°C*10)	636	266.88	3.95	1.48	218	273	268
BIO_11 (°C*10)	636	255.68	5.17	2.02	204	263	255.5
BIO_12 (mm)	636	2443.69	541.63	22.16	1582	4957	2326.5
BIO_13 (mm)	636	294.75	63.83	21.65	187	592	288
BIO_14 (mm)	636	107.75	37.01	34.35	22	203	101
BIO_15 (CV)	636	30.45	10.18	33.42	12	60	32
BIO_16 (mm)	636	812.35	192.15	23.65	487	1737	775
BIO_17 (mm)	636	368.7	114.35	31.01	100	643	358
BIO_18 (mm)	636	684.78	160.55	23.45	411	1636	666
BIO_19 (mm)	636	404.49	112.7	27.86	143	747	427.5
ALTITUD (msnm)	636	178.43	88.49	49.59	75	1547	156

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4: Resumen de las variables bioclimáticas en los puntos de muestreo de capirona

Variable	n	Media	D.E.	CV	Mín	Máy	Mediana
BIO_1 (°C*10)	660	263.18	3.76	1.43	216	269	264
BIO_2 (°C*10)	660	108.18	10	9.24	92	139	114
BIO_3 (%)	660	82.48	1.95	2.36	78	86	82
BIO_4 (DS)	660	439.36	67.72	15.41	312	618	437.5
BIO_5 (°C*10)	660	327.87	5.97	1.82	293	337	330
BIO_6 (°C*10)	660	197.3	10.1	5.12	130	212	192
BIO_7 (°C*10)	660	130.57	14.2	10.88	109	163	138
BIO_8 (°C*10)	660	264.71	3.62	1.37	215	270	265
BIO_9 (°C*10)	660	257.82	4.1	1.59	209	265	257
BIO_10 (°C*10)	660	267.28	3.67	1.37	223	273	268
BIO_11 (°C*10)	660	256.52	4.09	1.59	209	263	256
BIO_12 (mm)	660	2484.55	603.8	24.3	1636	4904	2320
BIO_13 (mm)	660	300.04	70.35	23.45	209	587	295

BIO_14 (mm)	660	107.95	35.31	32.71	50	183	101
BIO_15 (CV)	660	30.26	9.19	30.36	15	46	33
BIO_16 (mm)	660	825.34	216.93	26.28	577	1720	787
BIO_17 (mm)	660	372.01	107.94	29.02	177	588	358
BIO_18 (mm)	660	693.55	180.37	26.01	465	1618	664
BIO_19 (mm)	660	406.81	105.55	25.95	177	660	418.5
ALTITUD (msnm)	660	170.82	85.66	50.15	73	1439	157

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5: Resumen de las variables bioclimáticas en los puntos de muestreo de cacao de alta productividad

Variable	n	Media	D.E.	CV	Mín	Máx	Mediana
BIO_1 (°C*10)	607	253.17	12.32	4.87	139	268	248
BIO_2 (°C*10)	607	122.77	3.48	2.84	115	160	122
BIO_3 (%)	607	87.59	1.97	2.25	77	92	88
BIO_4 (DS)	607	480.63	81.64	16.99	234	933	499
BIO_5 (°C*10)	607	319.19	11.93	3.74	238	339	312
BIO_6 (°C*10)	607	179.54	14.09	7.85	32	195	175
BIO_7 (°C*10)	607	139.66	6.28	4.5	132	206	139
BIO_8 (°C*10)	607	255.51	11.56	4.53	140	268	252
BIO_9 (°C*10)	607	245.97	12.69	5.16	127	261	240
BIO_10 (°C*10)	607	257.9	12.58	4.88	151	273	252
BIO_11 (°C*10)	607	245.78	12.6	5.13	127	261	240
BIO_12 (mm)	607	2142.84	665.02	31.03	1052	3229	2497
BIO_13 (mm)	607	256.71	76.7	29.88	135	406	289
BIO_14 (mm)	607	95.18	33.55	35.25	14	146	117
BIO_15 (CV)	607	31.71	3.93	12.39	27	67	31
BIO_16 (mm)	607	714.36	227.26	31.81	351	1120	809
BIO_17 (mm)	607	306.76	95.91	31.27	62	467	359
BIO_18 (mm)	607	646.11	231.72	35.86	267	1070	793
BIO_19 (mm)	607	320.22	86.66	27.06	67	489	359
ALTITUD (msnm)	607	448.52	227.67	50.76	133	3024	481

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6: Resumen de las variables bioclimáticas en los puntos de muestreo de parcelas de cacao de PDA, ACATPA y GBIF

Variable	n	Media	D.E.	CV	Mín	Máy	Mediana
BIO_1 (°C*10)	155	258.53	6.23	2.41	211	269	260
BIO_2 (°C*10)	155	111.94	7.78	6.95	94	123	116
BIO_3 (%)	155	79.81	4.48	5.61	69	87	81
BIO_4 (DS)	155	613.27	248.71	40.55	384	1112	491
BIO_5 (°C*10)	155	327.28	7.88	2.41	280	336	330
BIO_6 (°C*10)	155	187.35	11.12	5.94	149	214	188
BIO_7 (°C*10)	155	139.94	13.2	9.43	109	162	144
BIO_8 (°C*10)	155	261.44	6.04	2.31	209	271	263
BIO_9 (°C*10)	155	251.17	9.49	3.78	208	264	256
BIO_10 (°C*10)	155	264.17	5.55	2.1	217	273	264
BIO_11 (°C*10)	155	249.2	8.59	3.45	207	263	253
BIO_12 (mm)	155	2706.86	468.49	17.31	1296	4033	2668
BIO_13 (mm)	155	338.73	57.1	16.86	152	540	327
BIO_14 (mm)	155	106.06	38.23	36.05	30	191	102
BIO_15 (CV)	155	36.53	12.4	33.95	9	56	37
BIO_16 (mm)	155	949.71	167.2	17.61	422	1484	896
BIO_17 (mm)	155	361.47	123.93	34.29	114	622	361
BIO_18 (mm)	155	783.99	173.35	22.11	298	1320	724
BIO_19 (mm)	155	410.62	146.51	35.68	150	834	422
ALTITUD (msnm)	155	220.06	125.94	57.23	80	1433	208

Fuente: Elaboración propia

5.2 Bolaina blanca (*Guazuma crinita*)

En la figura 2, se muestra la probabilidad de la distribución de bolaina blanca en el territorio peruano. Las diferentes tonalidades del color verde indica la adecuación potencial de las zonas para el desarrollo de esta especie, de esta manera, el color verde intenso identifica a las zonas con una probabilidad de adecuación mayor a 70% (óptimas), el color verde claro representa a las zonas con probabilidad de adecuación entre 50 y 70% (aptas). Fuera de estos rangos y representados de color blanco están las zonas en las cuales las condiciones climáticas limitarían el crecimiento de esta especie (adecuación inferior al 50%).

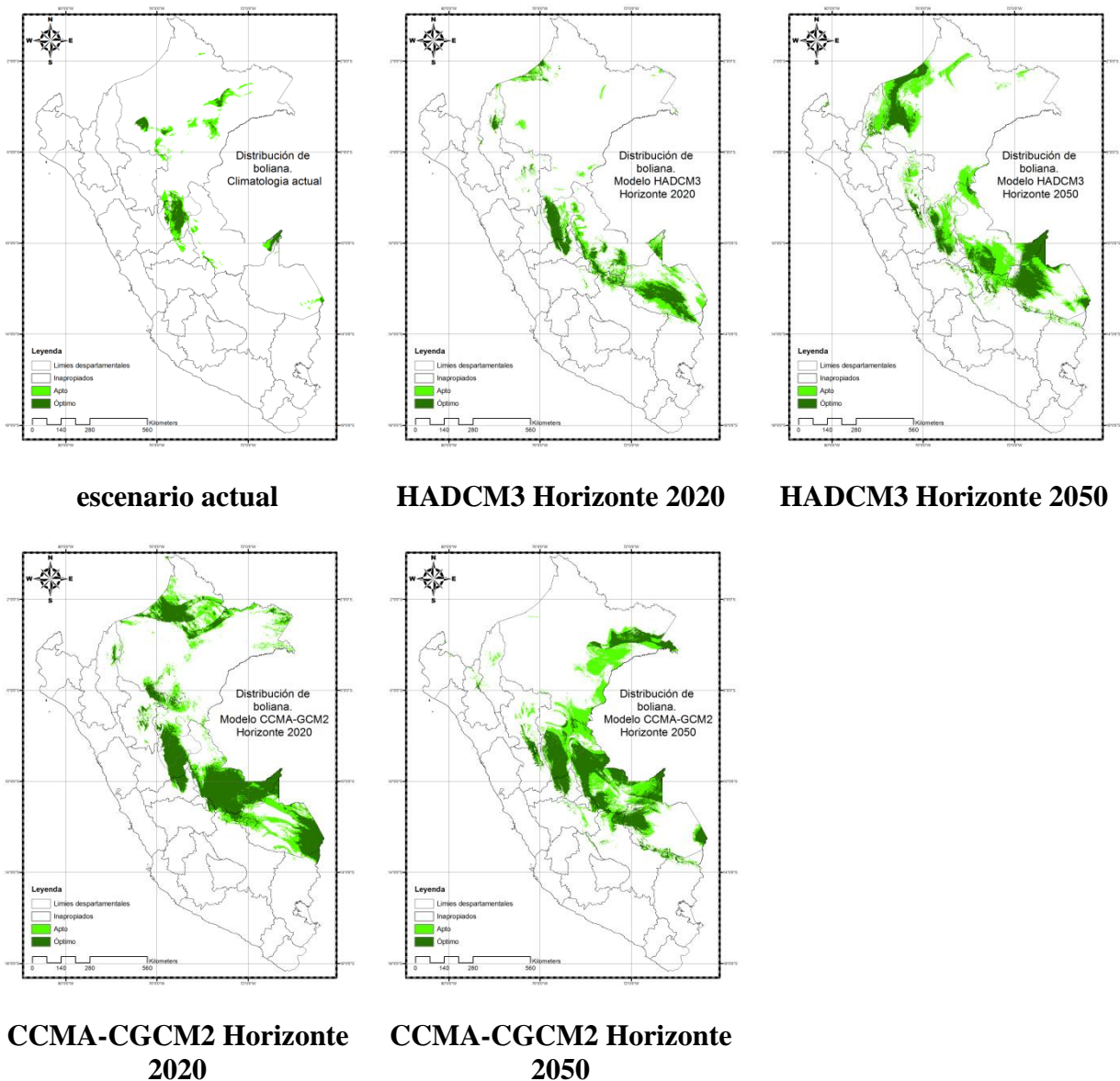


Figura 5: Mapas de la distribución potencial de la bolaina blanca (*Guazuma crinita*) en Perú en escenario actual y futuro (año 2020 y 2050; modelos HADCM3 y CCMA-CGCM2, escenario A2a)

Bajo las condiciones climáticas actuales (1950-2000) a nivel nacional se tiene 1'709,219.41 ha con probabilidades de adecuación mayores al 70% (condiciones óptimas). Si consideramos categorías aptas y óptimas (probabilidad de adecuación mayor al 50%) la superficie para bolaina se incrementa hasta bordear las 4'439,215.65 de ha. Loreto y Ucayali poseen las mayores áreas con 2'166,053.0 ha y 1'411,664.4 ha respectivamente. Los escenarios futuros muestran incrementos favorables para la boliana a nivel nacional. Para mediados de siglo el modelo HADCM3 reporta que el área con condiciones favorables (probabilidad de adecuación > 50%) para la boliana será de 19'194,737.33 ha, mientras que el modelo canadiense predice que bajo esta misma categoría existirán 21'333,823.83 ha.

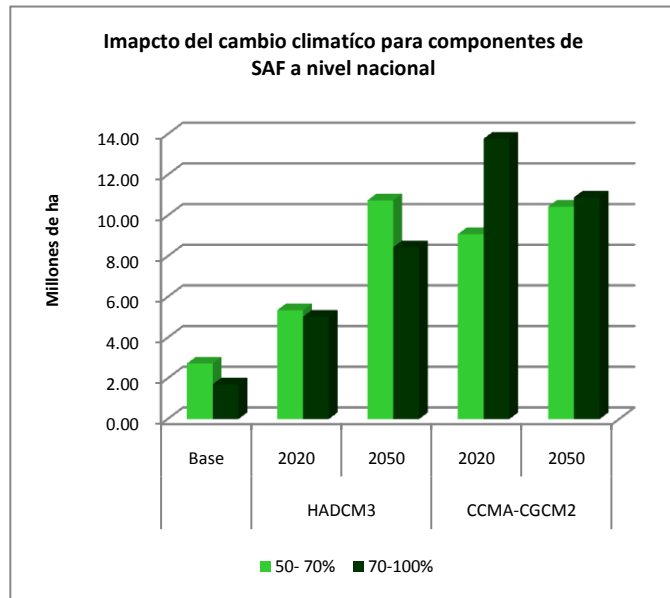


Figura 6: Potencial cambio en la distribución de la bolaina blanca (*Guazuma crinita*) en Peru frente a escenarios futuro (año 2020 y 2050; modelo HADCM3, CCMA-CGCM2 escenario A2a)

A pesar que las cifras a nivel nacional indican un incremento en las áreas con condiciones climáticas favorables para el desarrollo de la bolaina, el modelo HADCM3 evidencia una tendencia diferente para la cuenca del río Aguaytía, donde en primero lugar, ocurre una expansión de las zonas con condiciones climáticas favorables hacia el año 2020, seguido de una contracción significativa de las mismas hacia el año 2050. Para este periodo, la zonas con probabilidades de adecuación óptimas se desplazarán hacia la parte alta de la cuenca cerca a la localidad de Aguaytía (a 160 km de la ciudad de Pucallpa). Un área remanente con condiciones aptas permanecerá en la parte media de la cuenca (figura 4).

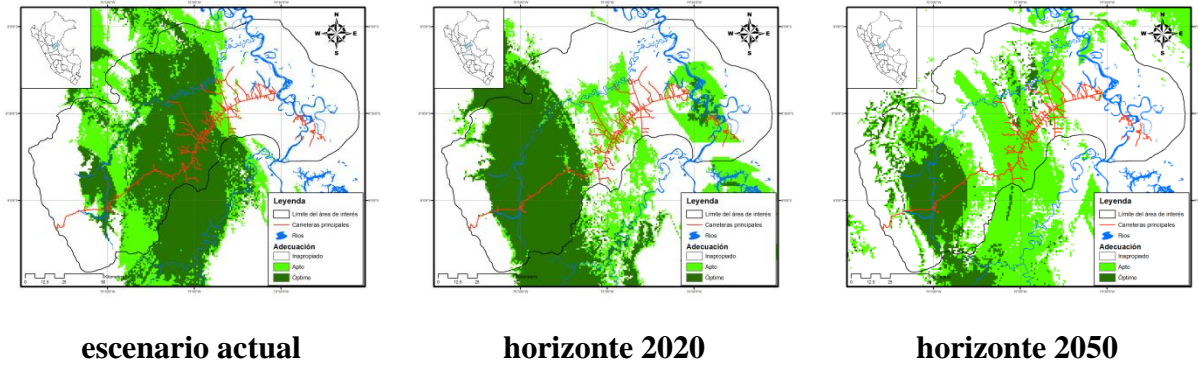


Figura 7: Mapas de la distribución potencial de la bolaina blanca (*Guazuma crinita*) en la cuenca Aguaytía en escenario actual y futuro (año 2020 y 2050; modelo HADCM3, escenario A2a).

La dirección de los cambios (positivos o negativos) puede verse en la figura 5. Durante el primer horizonte de análisis podemos observar que los cambios positivos (es la suma de todos los diversos tonos de verde) son ligeramente mayores a los cambios negativos (la suma de los diversos tonos de marrón), mientras que para el 2050 se prevé que las zonas con condiciones favorables para el desarrollo de bolaina se desplazaran fuera del área de influencia de la cuenca del río Aguaytía (figura 5).

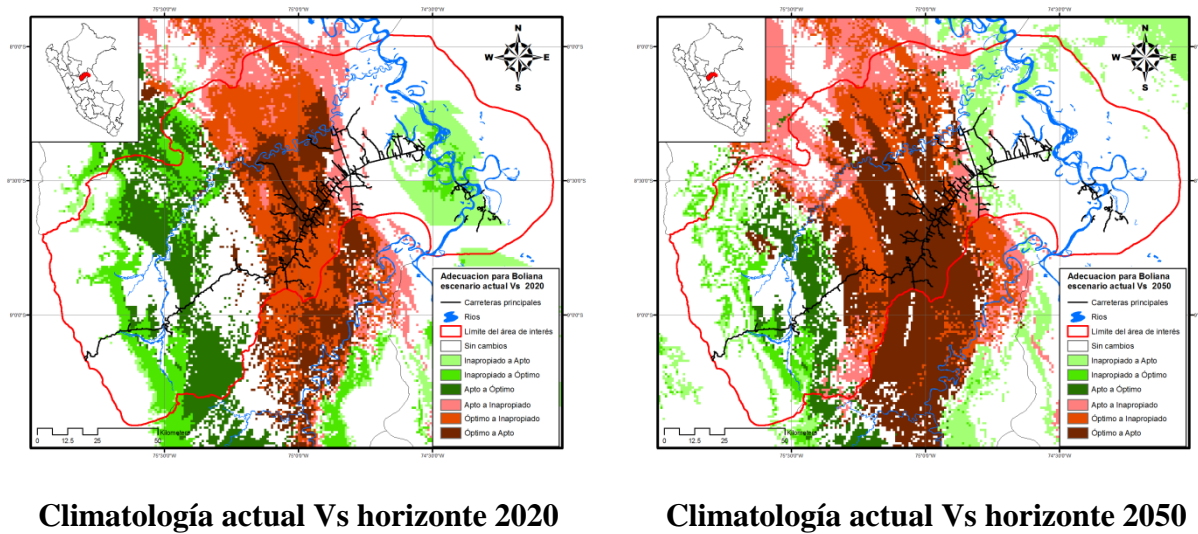


Figura 8: Mapas del potencial cambio en la distribución de bolaina blanca (*Guazuma crinita*) en la cuenca Aguaytía frente escenarios futuro (año 2020 y 2050; modelo HADCM3, escenario A2a).

El modelo HADCM indica que la superficie que sufrirá algún tipo de cambio positivo durante el periodo 2020 es de 472,458.96 ha, liderado por áreas que pasarán de aptas a aptas (196,829.90 ha). Así mismo, la superficie que experimentará cambios negativos asciende a 431,295.22 ha, liderados por el paso de áreas óptimas a inapropiadas (207,246.84 ha). De otro lado, el modelo CCMA-CGCM2 pronostica que las zonas que sufrirán cambios positivos para el periodo 2020 haciende a 382,234.76 ha, y los cambios negativos ocurrirán en 108,033.82 ha. Mientras que para mediados de siglo los cambios positivos son de 878,299.86 ha y los negativos son de 98,792.98 ha.

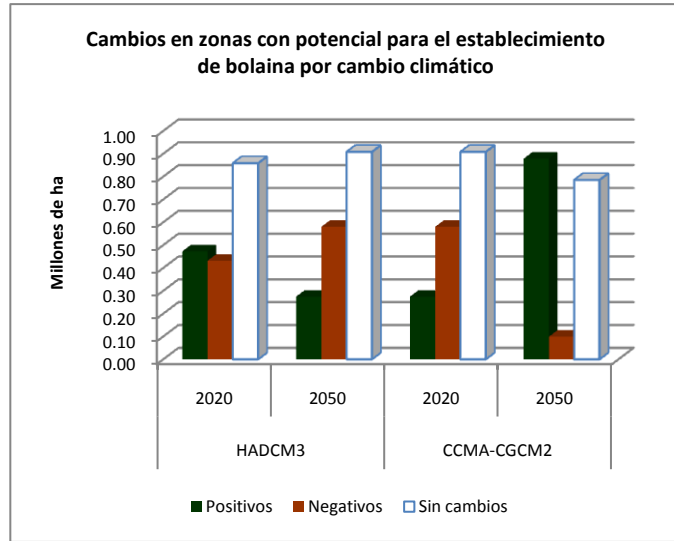


Figura 9: Potencial cambio en la distribución de bolaina blanca (*Guazuma crinita*) en la cuenca del río Aguaytía frente a escenarios futuro (año 2020 y 2050; modelo HADCM3 y CCMA-CGCM2 escenario A2a, escenario A2a)

5.2.1 Análisis de contribución e importancia de variables en la predicción de adecuación de bolaina

La importancia de las variables en la predicción de la adecuación de las zonas, puede verse en la figura 10. Las tres más importantes son:

- BIO5 = Temperatura máxima del mes más caliente (29.1 %)
- BIO8 = Temperatura promedio del trimestre más húmedo (19.8%)
- BIO18 = Precipitación en el trimestre más caliente (13.5%)

Las variables restantes no superan el umbral de 8% en importancia relativa.

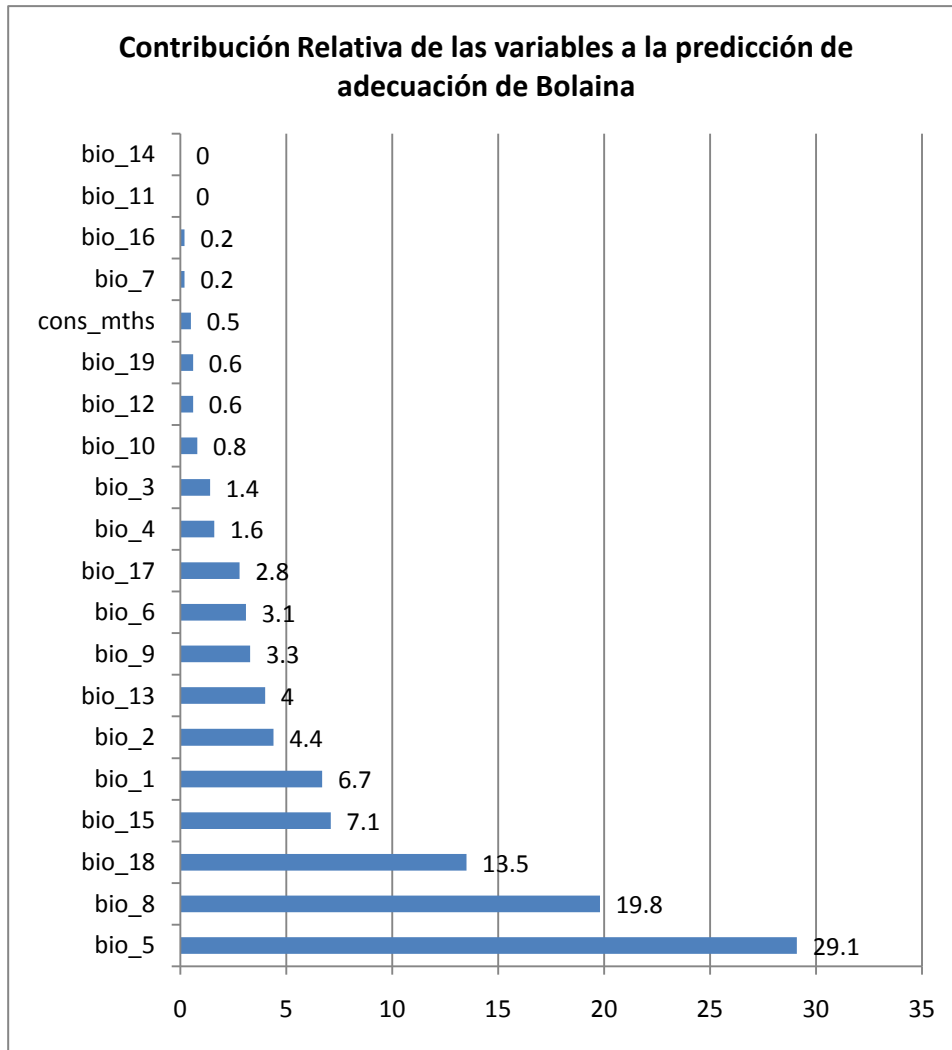


Figura 10: Contribución relativa de las variables climáticas al modelo Maxent para la predicción de la adecuación de bolaina

La siguiente figura muestra los resultados de la prueba de jackknife para la importancia de las variables. La variable ambiental con las mayores ganancias cuando es analizada de manera aislada es la variable BIO_5 (temperatura máxima del mes más caliente), la cual parece tener la información más útil por sí misma. La variable que decrece las ganancias cuando es omitida es la variable BIO_8 (temperatura promedio del trimestre más húmedo), la cual parece tener mayor información que no está presente en las otras variables (figura 11).

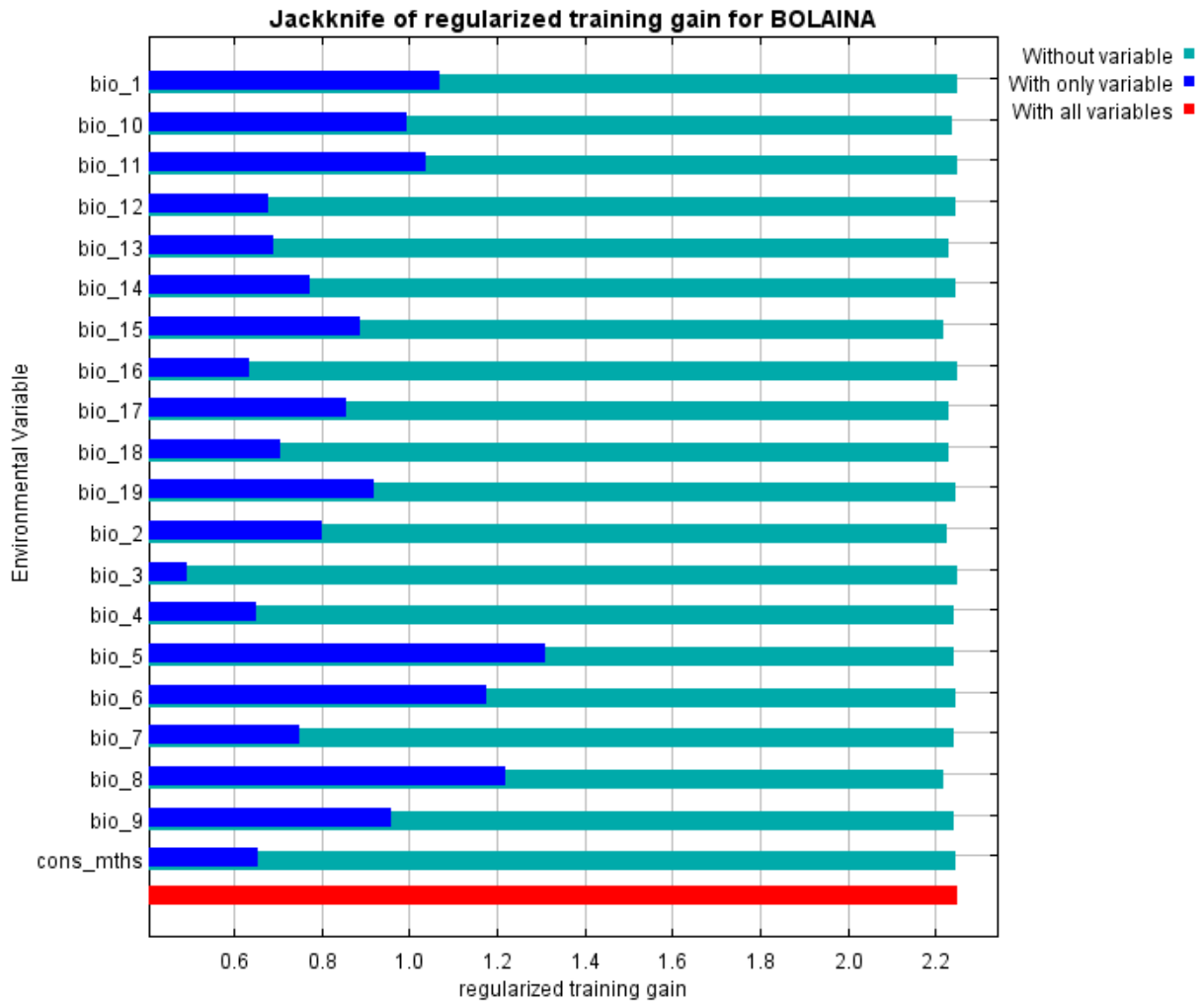


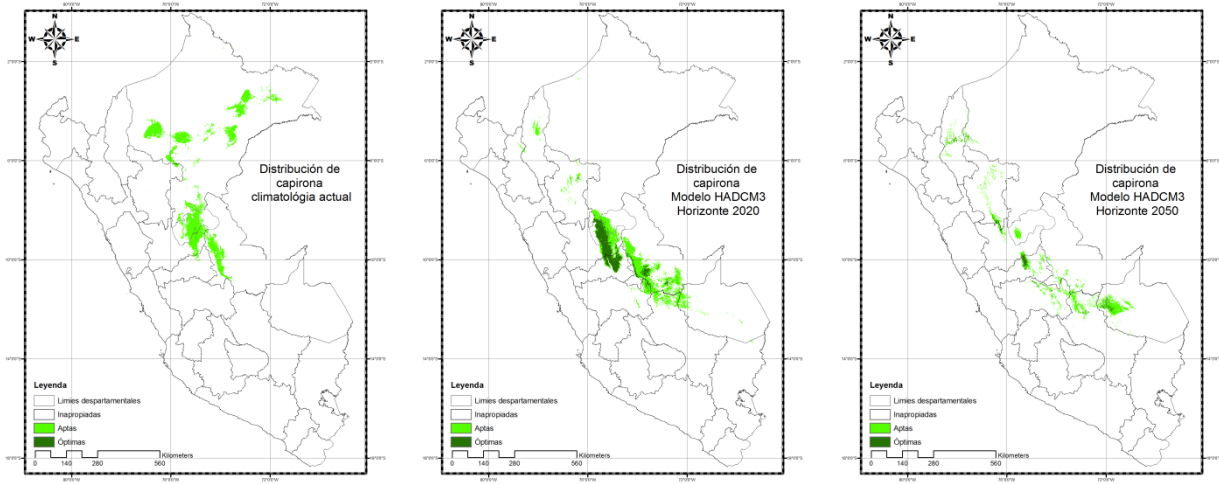
Figura 11: Prueba de jackknife para importancia de variables predicción de adecuación de bolaina

5.3 Capirona (*Calycophyllum spruceanum*)

Los resultados de la corrida de Maxent para la distribución de capirona bajo la climatología actual (promedio de 1950-2000) y los horizontes 2020 y 2050 se muestran en la figura 7. En el escenario actual, las zonas con probabilidades de adecuación mayores al 50% se encuentran alrededor de los puntos de colecta de capirona en los departamentos de Loreto, Ucayali y Huánuco. Sin embargo durante el horizonte 2020 y 2050 las zonas con probabilidad mayor a 50 desaparecen en el departamento de Loreto y aparecen zonas con estas mismas características al sur del departamento de Ucayali (modelo HADCM3). Para mitad de este siglo se espera un incremento de las condiciones climatológicas marginales para el desarrollo. Sin embargo las zonas con probabilidades de adecuación mayores a 50 se reducirán drásticamente en más del 48 con respecto al escenario base.

Por el contrario, el modelo CCMA-CGCM2 muestra que las condiciones futuras son favorables para la capirona. Sin embargo y pese a la aplicación de áreas con condiciones de adecuación favorables para esta especie, se debe tener en consideración que las zonas que actualmente muestran condiciones favorables, no serán las mismas a futuro.

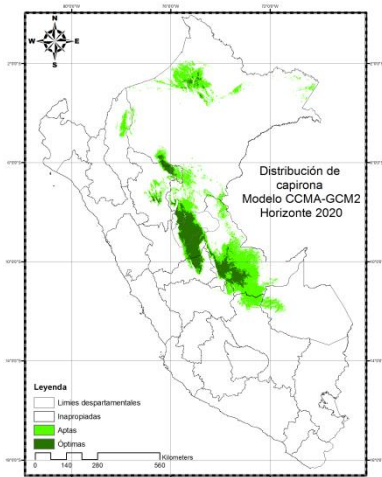
Predicción y evaluación del impacto del cambio climático sobre los sistemas agroforestales en la amazonia peruana y andina ecuatoriana



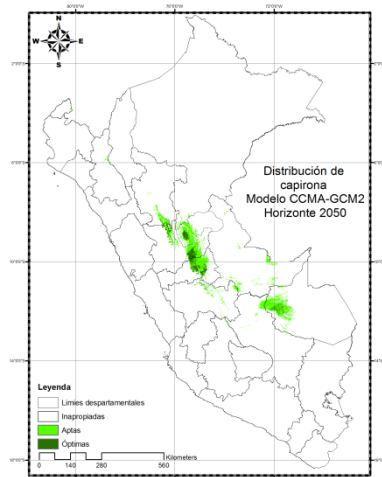
escenario actual

HADCM3 Horizonte 2020

HADCM3 Horizonte 2050



CCMA-CGCM2
Horizonte 2020



CCMA-CGCM2
Horizonte 2050

Figura 12: Mapas de la distribución potencial de la capirona (*Calycophyllum spruceanum*) en Perú en escenario actual y futuro (año 2020 y 2050; modelo HADCM3 y CCMA-CGCM2, escenario A2a).

A nivel nacional y bajo el modelo HADCM3 la superficie con probabilidad de adecuación mayor al 50% para el desarrollo de esta especie es de 4'008,256.46 ha, que se distribuyen en los departamentos de Loreto con 2'186,718.8 ha, Ucayali con 1'341,938.0 ha y Huánuco con 423,146.5 ha. Estas condiciones cambiaran para el periodo 2020 y el 2050. Para el primer escenario futuro las zonas con probabilidades mayores a 50% serán de 4'579,760.43 ha. Mientras que para el horizonte 2050 la superficie con probabilidad mayor al 50% será de 2'191,507.27 ha. El modelo CCMA-GCM2 pronostica que para el primer horizonte de análisis las zonas con probabilidades mayores a 50% se incrementarían en casi el 183% con respecto al escenario base, mientras que para mediados de siglo se prevé que estas zonas se reduzcan en -24%

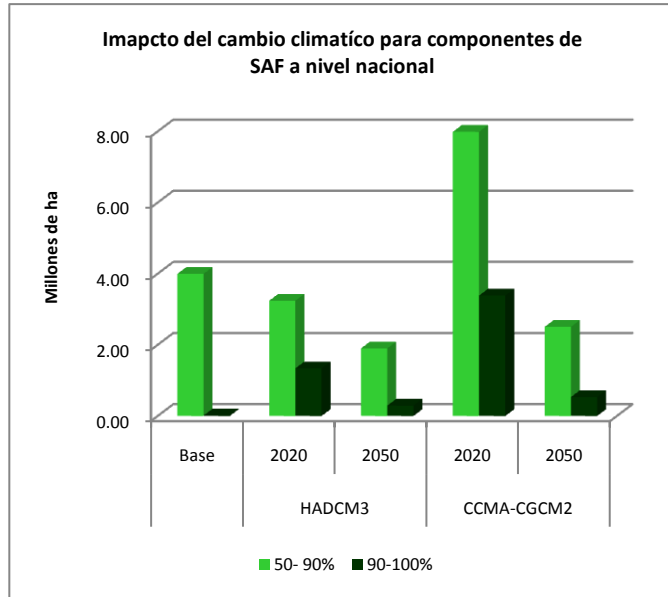


Figura 13: Potencial cambio en la distribución de la capirona (*Calycophyllum spruceanum*) en Peru frente a escenarios futuro (año 2020 y 2050; modelo HADCM3, CCMA-CGCM2 escenario A2a)

Bajo el escenario climatológico actual, en la cuenca del río Aguaytía potencialmente existiría 1'060,512.43 ha con probabilidades de adecuación inferiores al 50%; 684,746.26 ha con probabilidades entre 50 y 90% y 6,468.58 ha con probabilidades mayores a 90%¹¹. El 2020 se nota un incremento significativo de las zonas con probabilidad de adecuación mayor a 90% llegando a las 391,307.58 ha. Así mismo, se ve un desplazamiento de las áreas con probabilidades de adecuación mayores al 50% hacia las partes altas de la cuenca ubicadas hacia el oeste, alejándose de las zonas de muestreo. Para mediados de siglo, se presenta una reducción dramática de las zonas con probabilidades de adecuación mayores a 50 en un 84% con referencia al escenario base, notándose que las mejores zonas para la capirona se encontrarán cercanas a la localidad de Aguaytía, limitándose casi en su totalidad a zonas aptas.

¹¹ Al selección un umbral alto (>90%), las zonas con condiciones óptimas para la capirona se restringen a las áreas cercanas a las zonas de colecta.

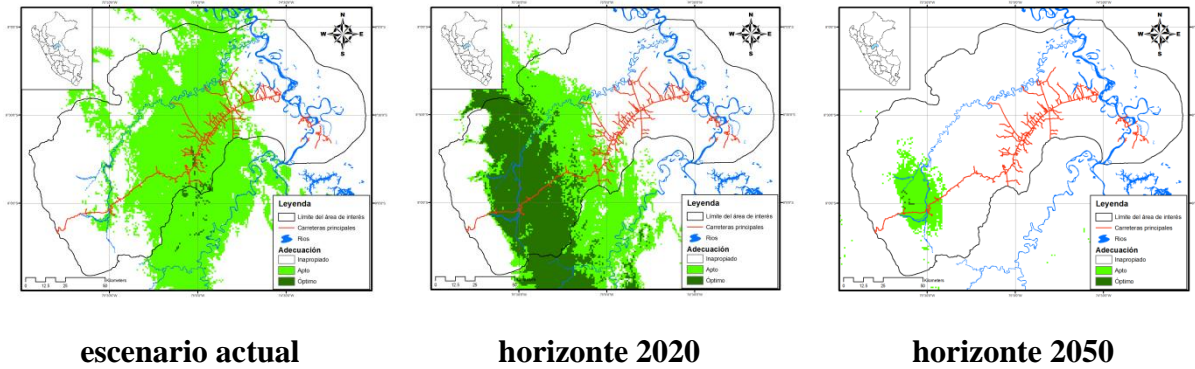


Figura 14: Mapas de la distribución potencial de la capirona (*Calycophyllum spruceanum*) en la cuenca Aguaytía en escenarios actual y futuro (año 2020 y 2050; modelo HADCM3, escenario A2a).

Este desplazamiento puede verse con claridad en la **figura 15**. Durante el horizonte 2020 se ve que existen cambios positivos casi en la misma magnitud que los negativos y que estos ocurren hacia el oeste de la cuenca. Para el horizonte 2050 los cambios negativos son de una magnitud más importantes que los cambios favorables, y estos últimos se concentran en la ciudad de Aguaytía.

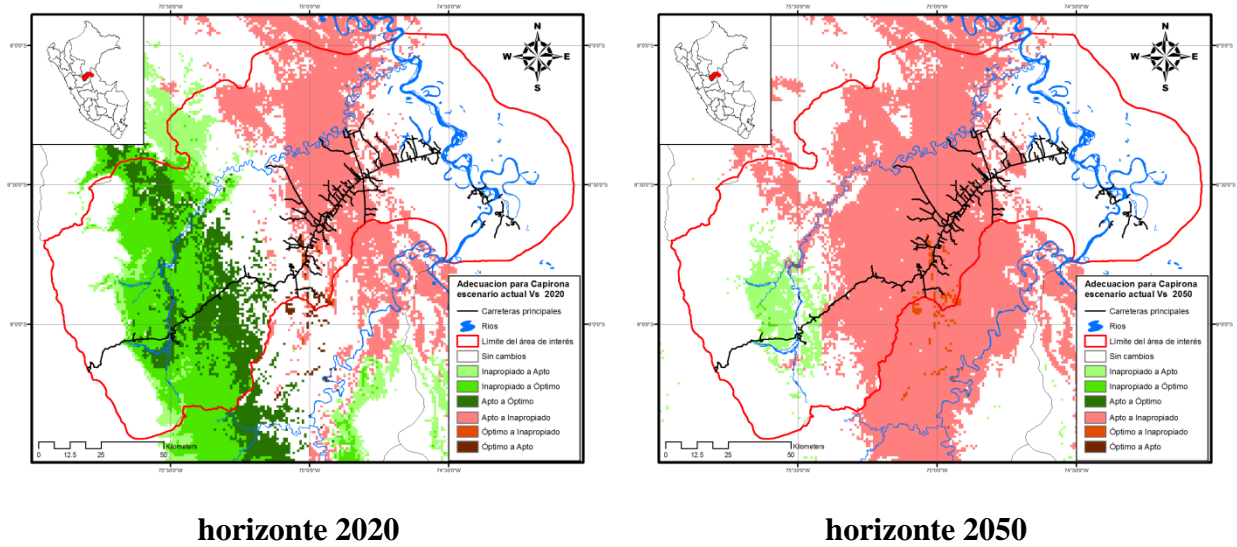


Figura 15: Mapas del potencial cambio en la distribución de la capirona (*Calycophyllum spruceanum*) en la cuenca Aguaytía frente a escenarios futuro (año 2020 y 2050; modelo HADCM3, escenario A2a).

Bajo el modelo HADCM3, los cambios positivos que se esperan para el año 2020 alcanzarán las 472,458.9 ha, mientras que para este mismo periodo, el modelo CCMA-CGCM2 pronostica cambios favorables del orden de 274,116.92 ha. Los cambios negativos serán de 431,295.22 ha para el primer periodo, mientras que para el segundo modelo serán de 580,072.74 ha. Los cambios negativos esperados para el segundo horizonte de análisis y el modelo HADCM3 serán 2 veces mayores a los cambios positivos (580,072.74 ha), mientras que el modelo CCMA-CGCM2 pronostica que los cambios positivos serán de 878,299.86 ha y los negativos serán de 98,792.98 ha.

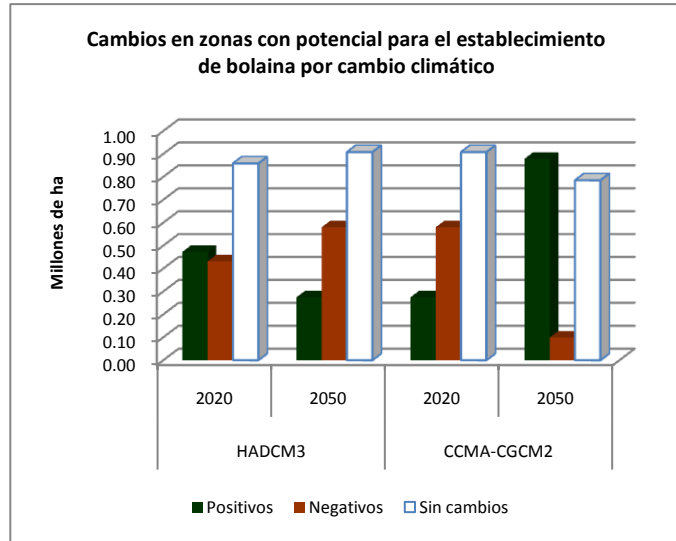


Figura 16: Proporción del potencial cambio en la distribución de la capirona (*Calycophyllum spruceanum*) en la cuenca Aguaytía frente a escenarios futuro (año 2020 y 2050; modelo HADCM3 y CCMA-CGCM2, escenario A2a).

5.3.1 Análisis de contribución e importancia de variables en la predicción de adecuación de capirona

La importancia relativa de las variables para el modelo Maxent que predice la distribución potencial de capirona, se puede observar en la figura 17. Siendo las más importantes las siguientes:

BIO_8 = Temperatura promedio del trimestre más húmedo (29.5%)

BIO_11 = Temperatura promedio del trimestre más frío (21.1%)

BIO_15 = Precipitación estacional (7.8%)

Las variables restantes no superan el umbral de los 6.6%.

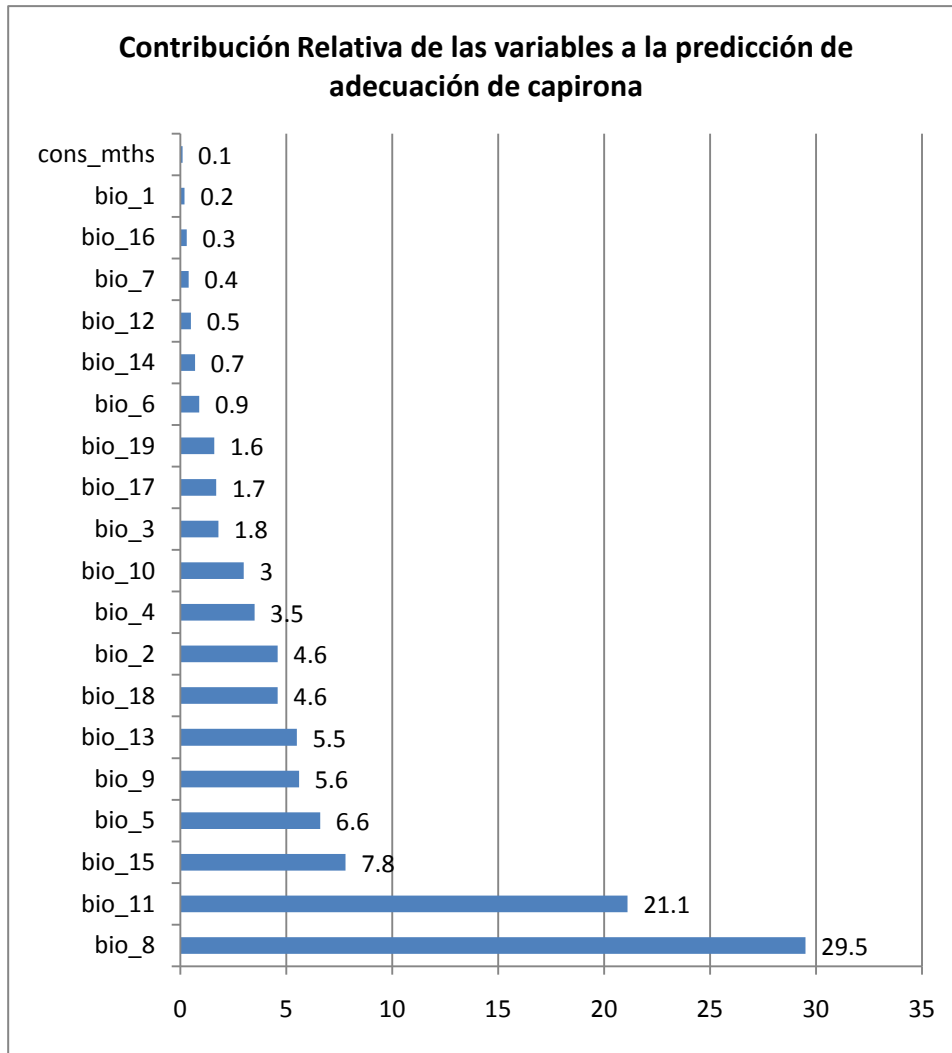


Figura 17: Contribución relativa de las variables climáticas al modelo Maxent para la predicción de la adecuación de capirona

La siguiente figura muestra los resultados de la prueba de jackknife para la importancia de las variables. La variable ambiental con las mayores ganancias cuando es analizada de manera aislada es la variable BIO_8 (temperatura promedio del trimestre más húmedo), la cual parece tener la información más útil por sí misma. La variable que decrece las ganancias cuando es omitida es la variable BIO_8 (temperatura promedio del trimestre más húmedo), la cual parece tener mayor información que no está presente en las otras variables (figura 7).

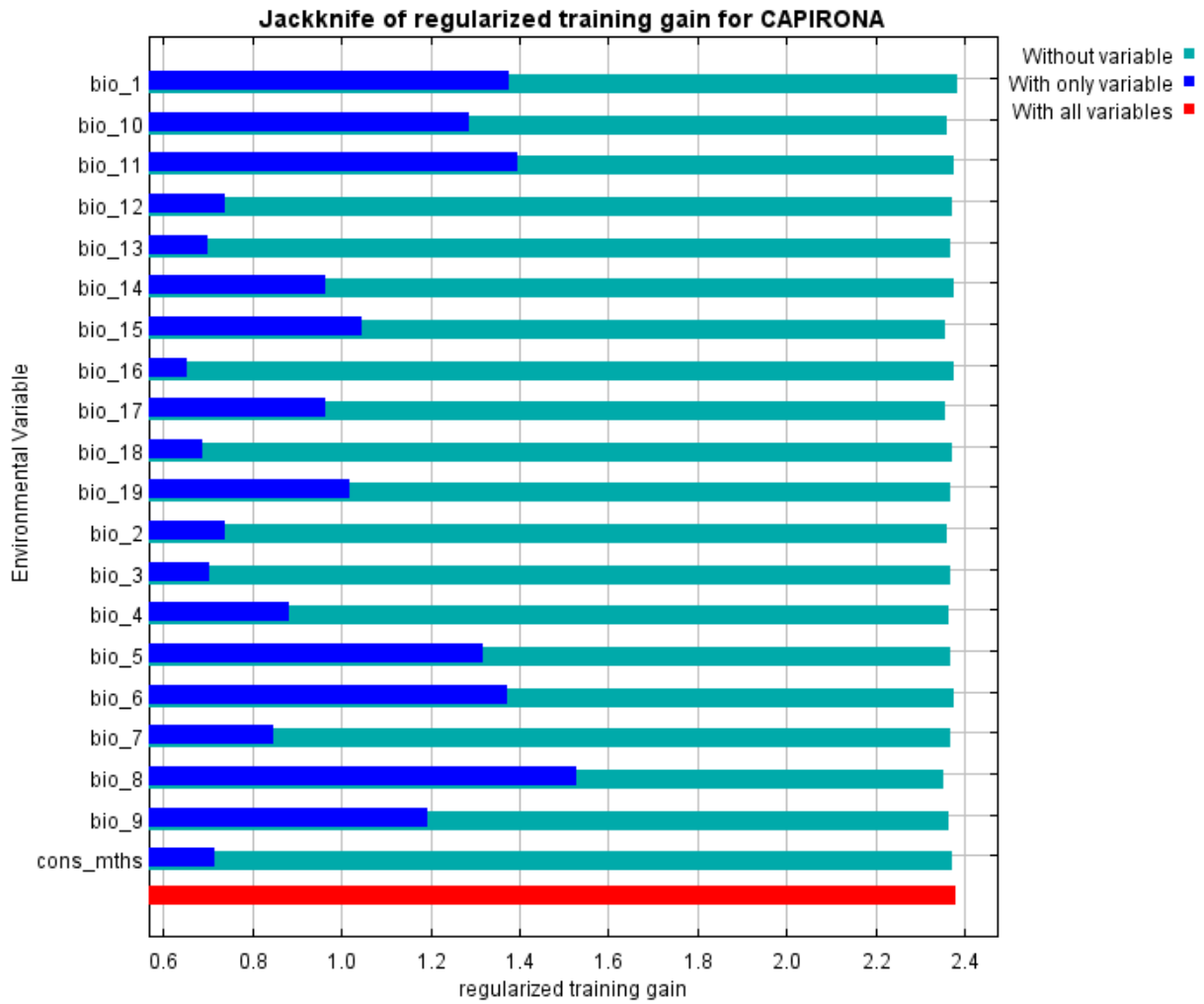


Figura 18: Prueba de jackknife para importancia de variables predicción de adecuación de capirona

5.4 Cacao (*Theobroma cacao*)

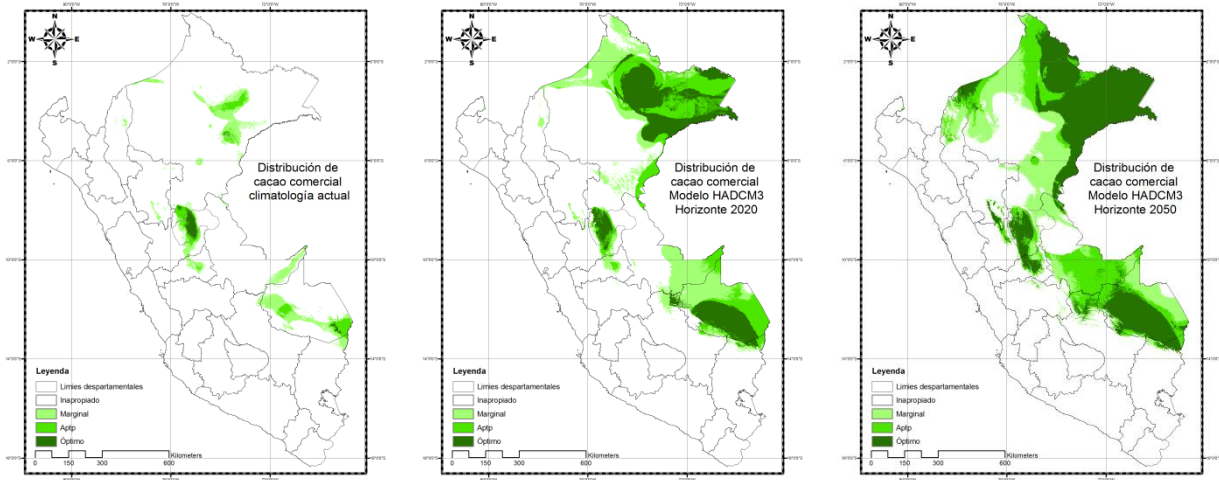
Para el cacao se usaron dos enfoques diferentes. En el primero se tomó en cuenta una base de datos de ubicación de parcelas comerciales provenientes de trabajos realizados por PDA y ACATPA y la base de datos en línea de GBIF. El segundo enfoque se basó en las colectas realizadas por el ICT a parcelas de altos rendimientos.

5.4.1 Parcelas comerciales de ACATPA, PDA y GBIF

En la figura 19 se muestra la distribución potencial actual y futura para el cacao basado en datos de ubicación provenientes de los trabajos realizados por el Programa de Desarrollo Alternativo (PDA) y las parcelas de los miembros de la Asociación de Cacaoteros Tecnificados de Padre Abad (ACAPTA). Adicionalmente se consultó la base de datos de *Global Biodiversity Information Facility* (<http://www.gbif.org/>), debido a que los datos de PDA y ACATPA se restringían solo a la cuenca del río Aguaytía.

En términos generales, tanto el modelo británico (HADCM3) así como el canadiense (CCMA-CGCM2) muestran que las condiciones climatológicas futuras serán favorables para el desarrollo de plantaciones de cacao comercial.

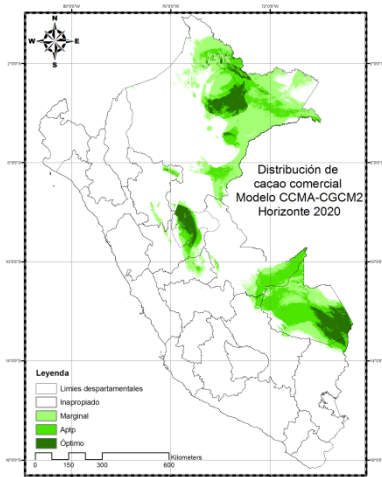
Predicción y evaluación del impacto del cambio climático sobre los sistemas agroforestales en la amazonia peruana y andina ecuatoriana



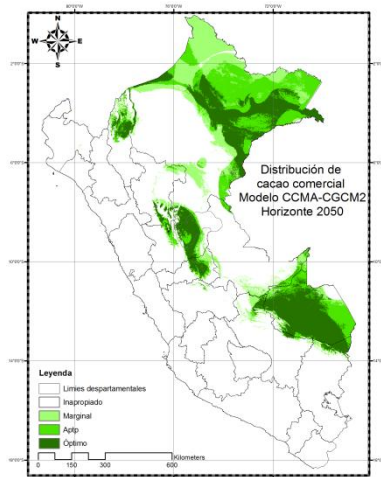
escenario actual

HADCM3 Horizonte 2020

HADCM3 Horizonte 2050



CCMA-CGCM2
Horizonte 2020



CCMA-CGCM2
Horizonte 2050

Figura 19: Mapas de la distribución potencial del cacao (*Theobroma cacao*) en Perú, en escenarios actual y futuro (año 2020 y el 2050; modelos HADCM3 y CCMA-CGCM2, escenario A2a).

En el escenario base podemos contabilizar 2'403,878.58 ha con probabilidades mayores al 50%. Los modelos HADCM3 y CCMA-CGCM2 estiman estas áreas en 21'351,801.46 ha y 4'021,630.95 ha respectivamente para el horizonte 2020. Mientras que para el horizonte 2050 el modelo HADCM3 pronostica en 34'488,327.94 ha la superficie con probabilidades de adecuación mayores a 50% y el modelo CCMA-CGCM2 estima estas mismas áreas en 28'007,810.68 ha. Con cualquiera de los escenarios futuros y modelos usados, Maxent prevé que habrá un incremento de las zonas con potencial para el establecimiento de cacao comercial a nivel nacional.

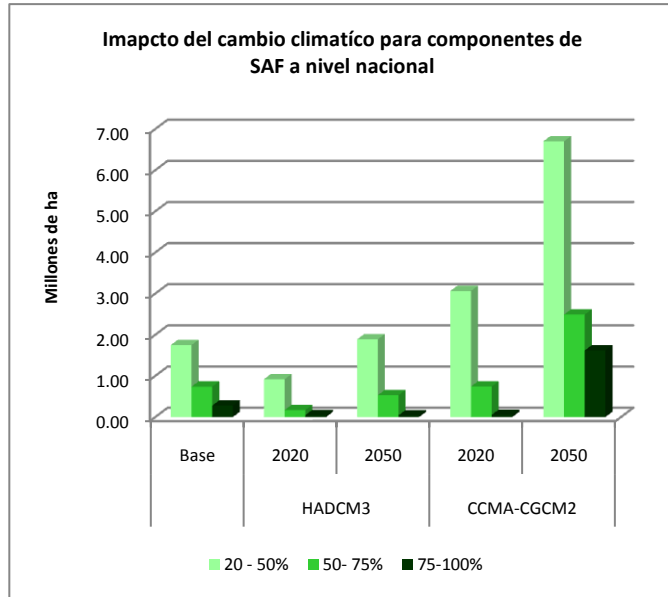


Figura 20: Potencial cambio en la distribución de la distribución del cacao (*Theobroma cacao*) en Peru frente a escenarios futuro (año 2020 y 2050; modelo HADCM3 y CCMA-CGCM2, escenario A2a)

Al analizar la climatología actual para la cuenca del río Aguaytía y considerando solo las áreas con probabilidades de adecuación mayores a 50% (zonas aptas y óptimas) obtuvimos una superficie de 564,615.34 ha, que es equivalente al 32 de la cuenca. A pesar de los cambios sustanciales ocurridos a nivel nacional, a nivel de cuenca se ve una leve estabilidad en la distribución de las zonas con aptitud para el establecimiento de sistemas agroforestales con cacao comercial. Para el año 2020, el modelo HADCM3 estima en 796,560.43 ha las zonas con probabilidades de adecuación mayores a 50%, mientras que el modelo CCMA-CGCM2 contabiliza 753,128.48 ha. Esta tendencia al incremento se mantiene para el horizonte 2050, donde el primer modelo pronostica que las áreas con probabilidades mayores al 50% serán de 965,751.81 ha y el modelo CCMA-CGCM2 los estima en 936,937.19 ha. El cambio y la dirección de los mismos puede verse con mayor claridad en la figura 22.

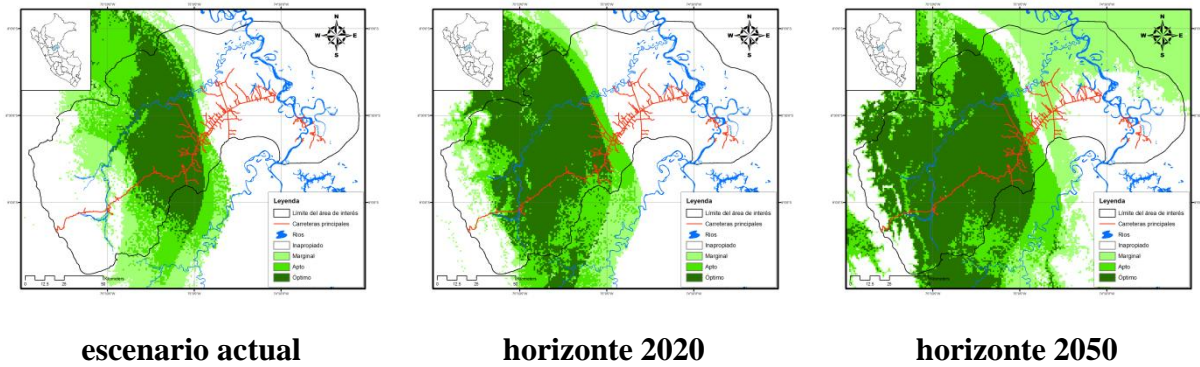


Figura 21: Mapas de la distribución potencial cacao (*Theobroma cacao*) en en la cuenca Aguaytía en escenarios actual y futuro (año 2020 y el 2050; modelo HADCM3, escenario A2a).

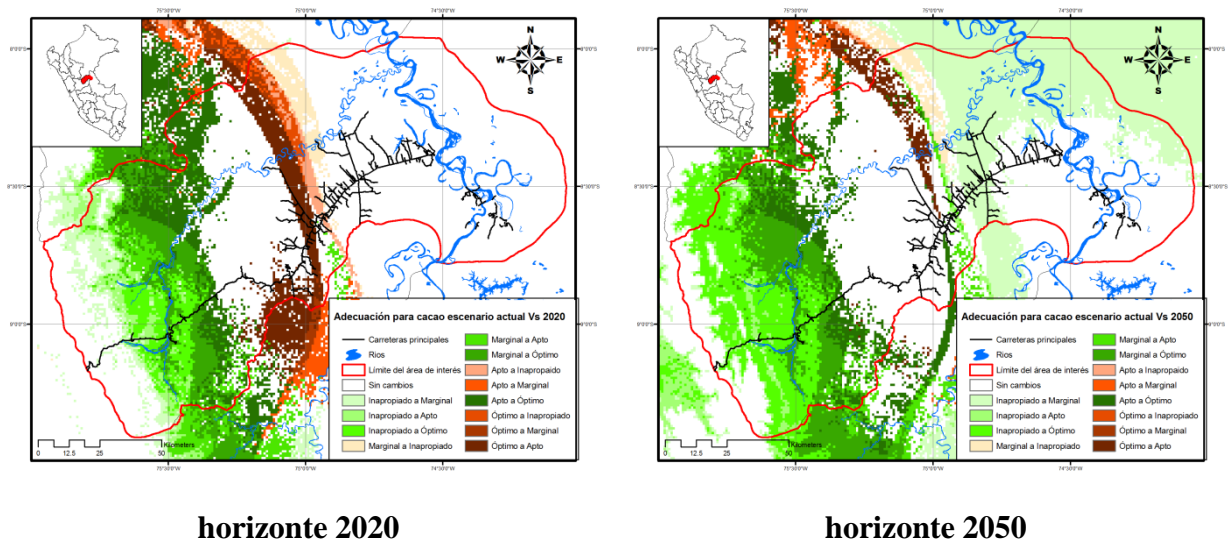


Figura 22: Mapas del potencial cambio en la distribución cacao (*Theobroma cacao*) en la cuenca Aguaytía, comparando el escenario actual y futuro (año 2020 y el 2050; modelo HADCM3, escenario A2a).

Los cambios positivos y negativos para el horizonte 2020 que experimentará la distribución de las zonas con potencial climatológico para el cacao según el modelo HADCM3 serán de 470,442.78 ha y 162,134.74 ha respectivamente. Este modelo pronostica que para el horizonte 2050, los cambios positivos serán de 824,198.94 ha y los cambios negativos serán de 54,016.91 ha. El modelo CCMA-CGCM2 muestra que para el periodo 2020 los cambios positivos serán de 382,486.78 ha y los cambios negativos serán del orden de las 78,127.10 ha. De otro lado, para mediados de siglo este moldeo pronostica que los cambios positivos serán de 554,618.43 ha y los cambios negativos solo llegaran a 94,928.63 ha.

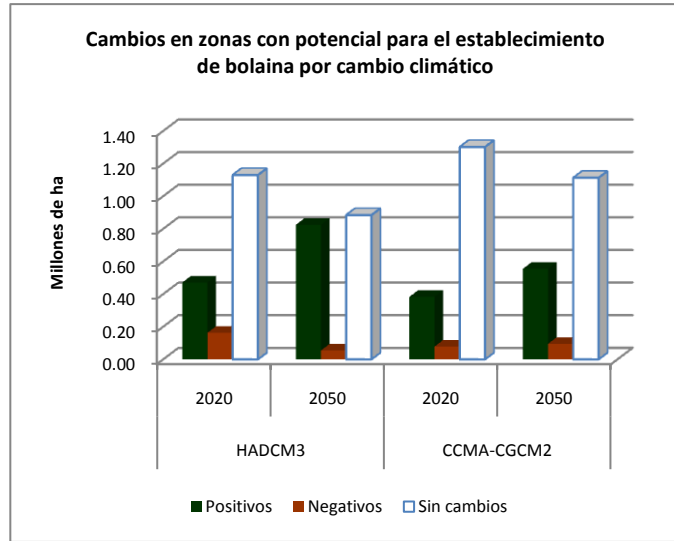


Figura 23: Potencial cambio en la distribución de la distribución cacao (*Theobroma cacao*) en la cuenca Aguaytía frente escenarios futuro (año 2020 y el 2050; modelo CCCMA-CGCM2, escenario A2a).

5.4.1.1 Análisis de contribución e importancia de variables en la predicción de adecuación de capirona

Las variables y su contribución relativa pueden verse en la figura 24. Entre ellas destacan:

BIO_5 = Temperatura máxima del mes más caliente (34.7%)

BIO_18 = Precipitación en el trimestre más caliente (23.3%)

BIO_16 = Precipitación en el trimestre más húmedo (18.4)

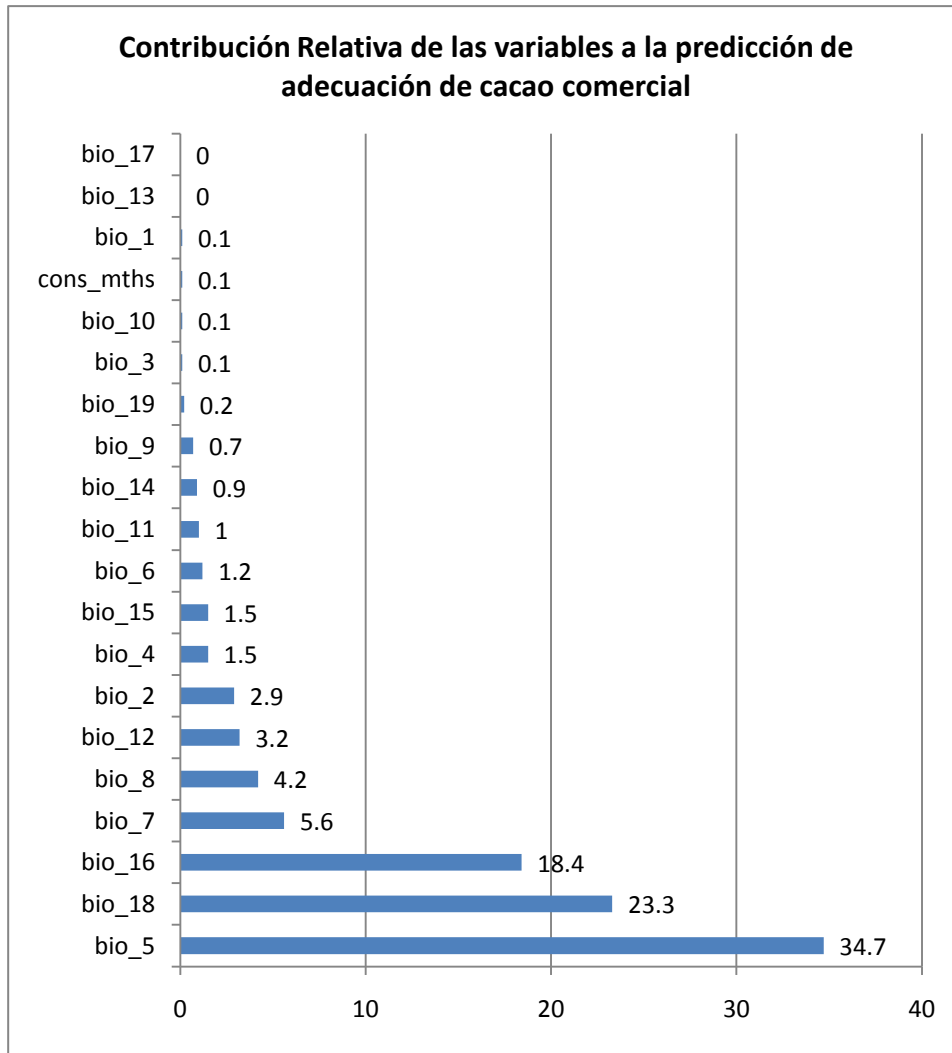


Figura 24: Contribución relativa de las variables climáticas al modelo Maxent para la predicción de la adecuación de cacao comercial.

La siguiente figura muestra los resultados de la prueba de jackknife para la importancia de las variables. La variable ambiental con las mayores ganancias cuando es analizada de manera aislada es la variable BIO_5 (temperatura máxima del mes más caliente), la cual parece tener la información más útil por sí misma. La variable que decrece las ganancias cuando es omitida es la variable BIO_18 (precipitación en el trimestre más caliente), la cual parece tener mayor información que no está presente en las otras variables (figura 25).

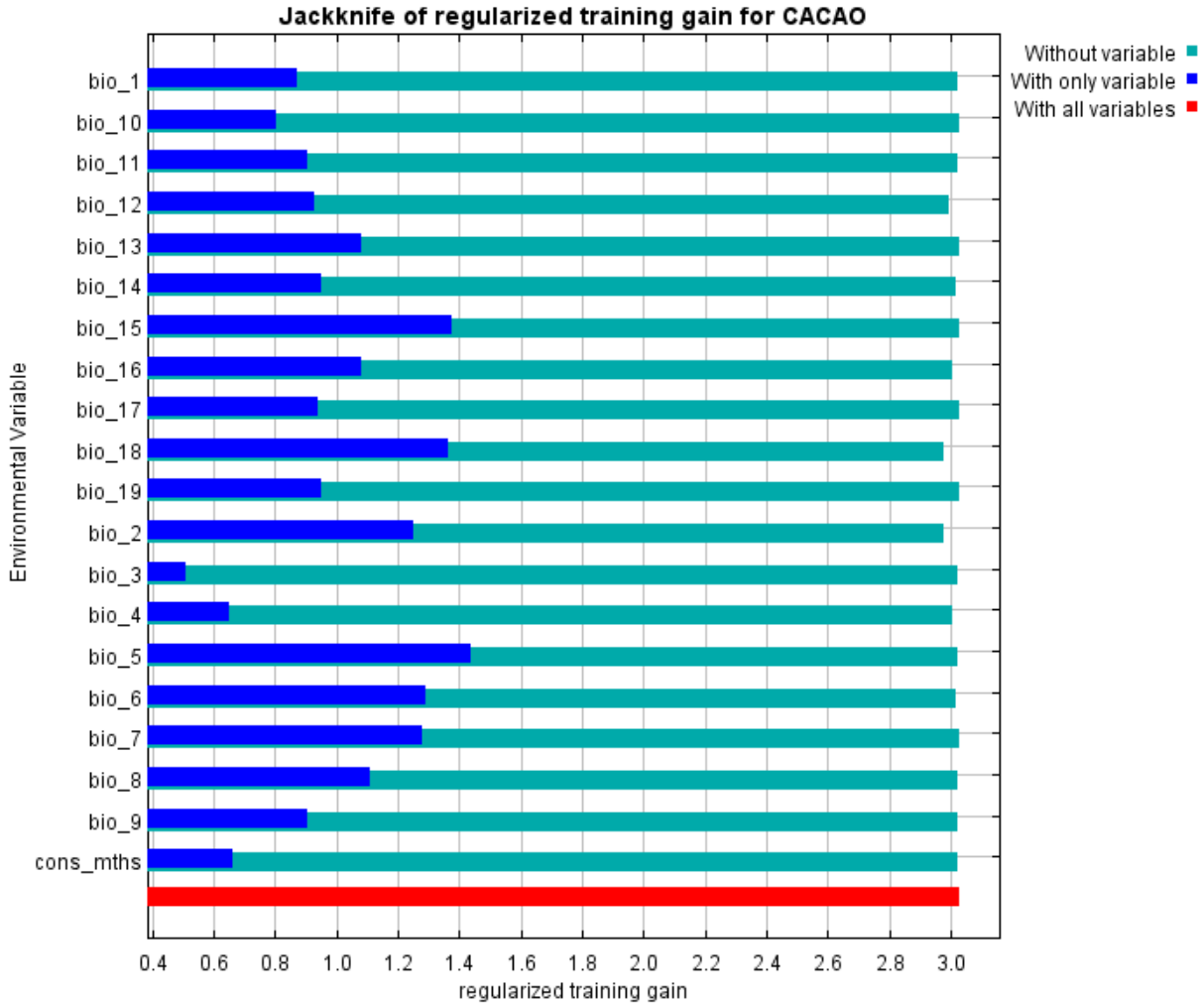


Figura 25: Prueba de jackknife para importancia de variables predicción de adecuación de cacao comercial

5.4.2 Parcelas comerciales de cacao de alta productividad. Colecta ICT

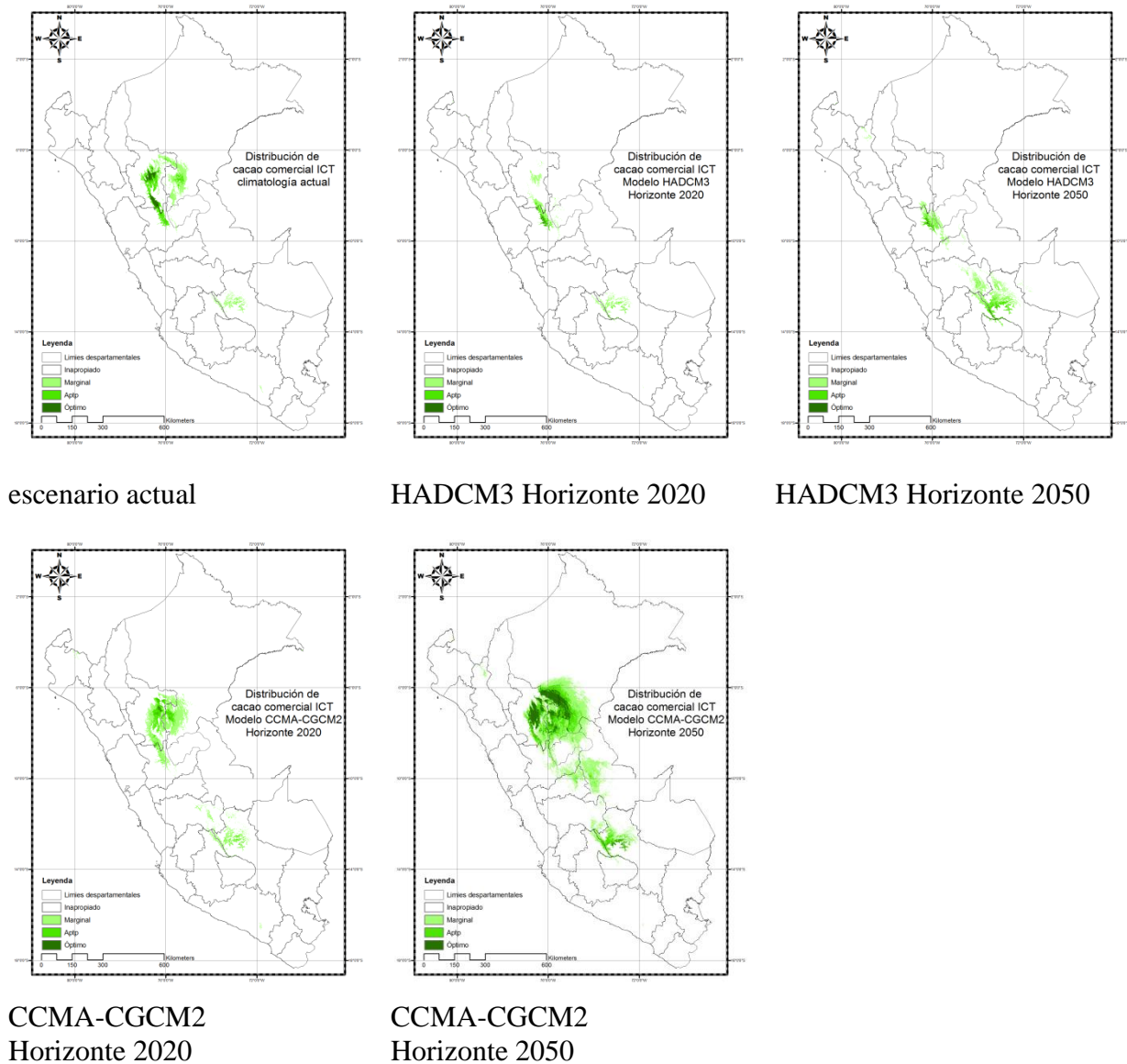
A continuación se hará un análisis de la distribución potencial de una colecta de cacao de alta productividad realizado por ICT. La distribución de zonas adecuadas bajo condiciones climatológicas actuales puede verse en la figura 26. De la misma manera se puede ver las proyecciones a futuro basados en los resultados de los dos modelos en estudio.

Esta colecta no incluyó parcelas dentro de la cuenca del río Aguaytía y se concentró en los departamentos de San Martín, Huánuco, sur de Loreto y Cusco.

Tomado en cuenta los resultados de las corridas de Maxent para el horizonte 2020 y el modelo HADCM3, las condiciones óptimas y aptas se reducirán tanto en San Martín, Huánuco, Loreto

y Cusco, sin embargo a mediados de siglo, las condiciones mejorarán levemente en Cusco y en la parte de la Divisoria entre Huánuco y el departamento de Ucayali.

De otro lado, los resultados de Maxent con el modelo CCMA-CGCM2, pronostican que hacia mediados de siglo habrá un incremento sostenible de las condiciones climatológicas favorables para plantaciones de cacao de alta productividad, especialmente en la zona limítrofe entre el departamento de San Martín y Loreto. De igual manera se puede apreciar que Cusco incrementa sus áreas favorables, y que Ucayali empieza a tener condiciones para la producción de cacao.



escenario actual

HADCM3 Horizonte 2020

HADCM3 Horizonte 2050

CCMA-CGCM2
Horizonte 2020

CCMA-CGCM2
Horizonte 2050

Figura 26: Mapas de la distribución potencial del cacao de alta productividad (*Theobroma cacao*) en Perú, en escenarios actual y futuro (año 2020 y el 2050; modelos HADCM3 y CCMA-CGCM2, escenario A2a).

Tabla 7: Adecuación del cacao comercial de alto rendimiento a la climatología actual y futura. Datos a nivel nacional

Adecuación	Base	HADCM3		CCMA-CGCM2	
		2020	2050	2020	2050
0-20%	125'997,176.60	127'701,019.53	126'319,345.90	124'983,876.46	117'953,025.17
20 - 50%	1'749,459.07	919,127.57	1'886,643.55	3'061,910.41	6'701,121.32
50- 75%	738,259.13	169,947.45	528,744.08	739,519.24	2'489,566.37
75-100%	276,805.17	47,128.29	40,323.67	51,916.72	1'617,987.12
> a 50%	1'015,064.30	217,075.74	569,067.74	791,435.96	4'107,553.49

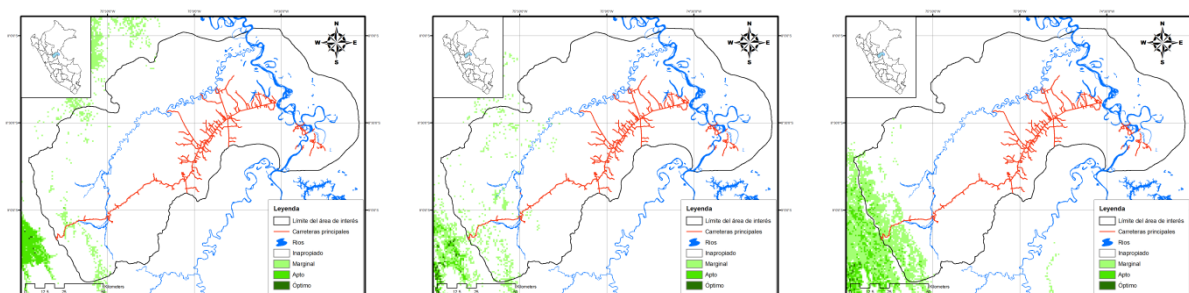
Fuente: Elaboración propia

De otro lado las condiciones climáticas actuales y futuras no son favorables para el cacao comercial en la cuenca del río Aguaytía, sin embargo se ve un ligero incremento en áreas con condiciones aptas hacia mediados de siglo, especialmente con el modelo CCMA-CGCM2 (tabla 3).

Tabla 8: Adecuación del cacao comercial de alto rendimiento a la climatología actual y futura. Datos a nivel de cuenca

	Base	HADCM3		CCMA-CGCM2	
		2020	2050	2020	2050
0-20%	1,729,045.22	1,716,948.12	1,665,283.42	1,749,375.07	1,197,612.90
20 - 50%	22,514.05	34,695.15	81,235.39	2,520.23	526,055.83
50- 75%	168.02	252.02	5,208.47	0.00	28,058.55
75-100%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
> a 50%	168.02	252.02	5,208.47	0.00	28,058.55

Fuente: Elaboración propia



escenario actual

horizonte 2020

horizonte 2050

Figura 27: Mapas de la distribución potencial cacao de alto rendimiento (*Theobroma cacao*) en la cuenca Aguaytía en escenarios actual y futuro (año 2020 y el 2050; modelo HADCM3, escenario A2a).

5.4.2.1 Análisis de contribución e importancia de variables en la predicción de adecuación de capirona

La siguiente figura muestra una estimación heurística de la contribución relativa de las variables ambientales al modelo Maxent. Para determinar el estimado en cada iteración del algoritmo de entrenamiento, el incremento en la ganancia regularizada es adherido a la contribución de la variable correspondiente, o sustraída de la ella si el cambio del valor absoluto de lambda es negativo. Al igual que la prueba de jackknife, la contribución de la variable debe ser interpretada con cuidado cuando la variable predictiva esta correlacionada.

Para el caso del cacao de alto rendimiento las variables de mayor importancia son:

BIO_2 = Rango diurno promedio (29.9%)

BIO_3 = Isothermalidad (29.3%)

BIO_5 = Temperatura máxima del mes más caliente (17.7%)

BIO_15 = Precipitación estacional (16.1%)

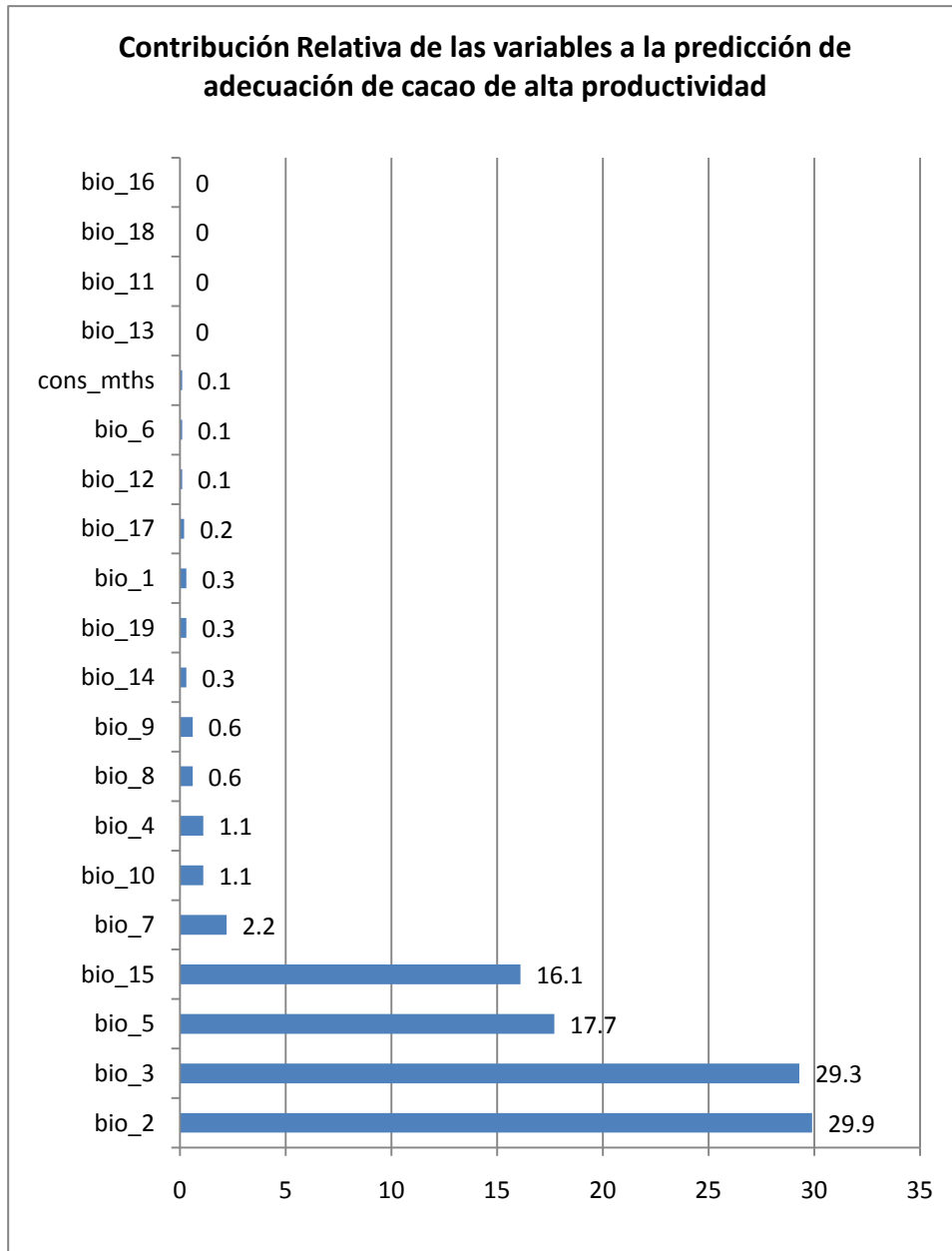


Figura 28: Contribución relativa de las variables climáticas al modelo Maxent para la predicción de la adecuación de cacao de alta productividad

La siguiente figura muestra los resultados de la prueba de jackknife para la importancia de las variables. La variable ambiental con las mayores ganancias cuando es analizada de manera aislada es la variable BIO_2 (rango diurno promedio), la cual parece tener la información más útil por sí misma. La variable que decrece las ganancias cuando es omitida es la variable BIO_3 (isotermalidad), la cual parece tener mayor información que no está presente en las otras variables (figura 29).

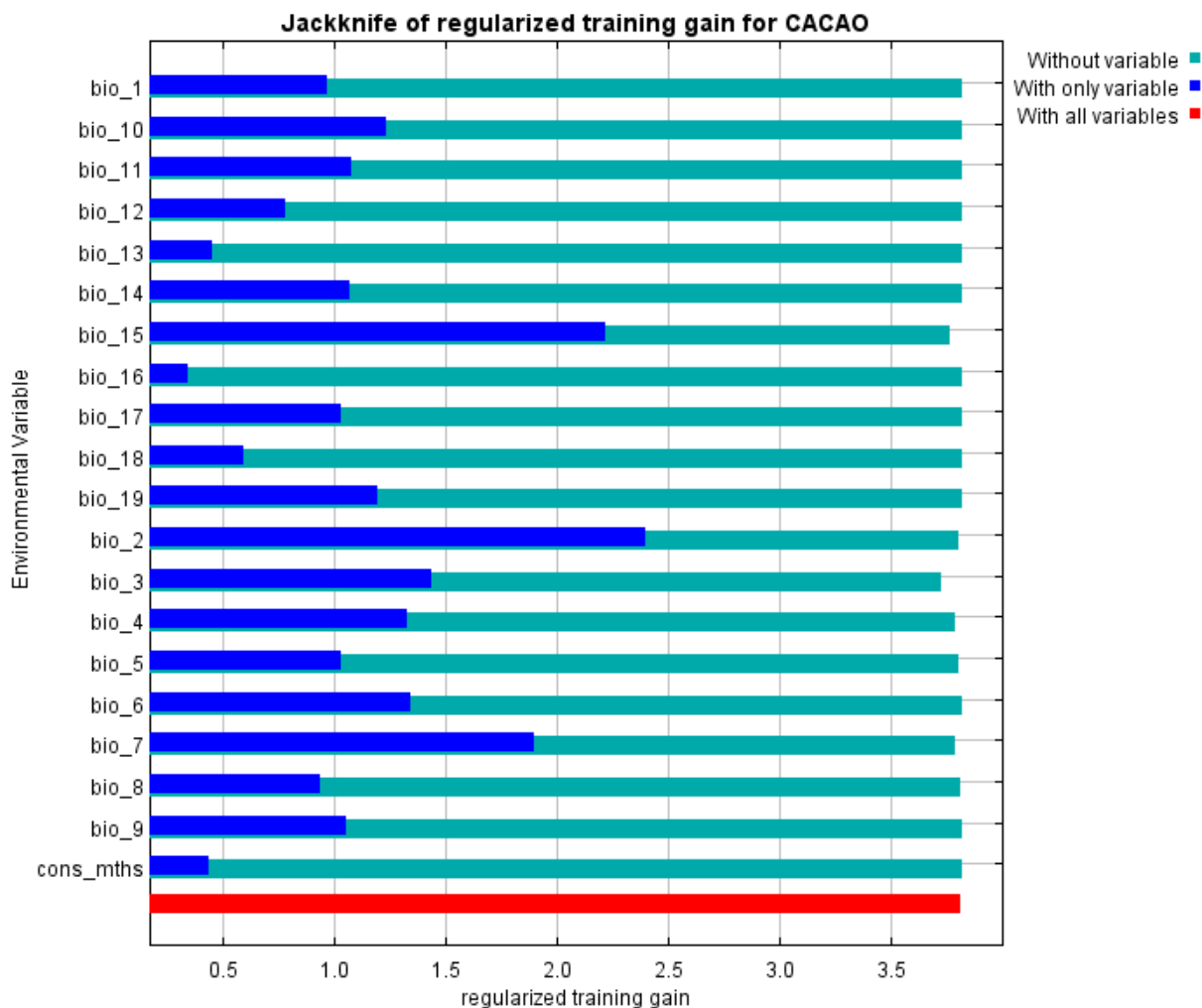


Figura 29: Prueba de jackknife para importancia de variables predicción de adecuación de cacao de alto rendimiento.

5.5 Como incluir variables edáficas en las proyecciones.

Luego de generado el mapa de adecuación de las especies a las condiciones climatológicas, y a falta de una base de datos de suelo a nivel nacional confiable, se tomo como referencia el estudio de mazo zonificación edáfica de bolaina realizado por Soudre (2008).

En este se detallan condiciones altas, medias y bajas para el desarrollo de la bolaina usando como fuente el estudio de Zonificación Económica Ecológica (ZEE) realizada por el IIAP (2000). La macro-zonificación tomo en consideración datos físico-químicos, así como componentes paisajísticos.

Si bien es cierto que la bolaina y la capirona son especies con requerimientos de suelo distintos y con, el nivel de detalle de los polígonos de la ZEE no permite capturar estas limitaciones, en tal sentido se usará el mismo mapa para la bolian y la capirona.

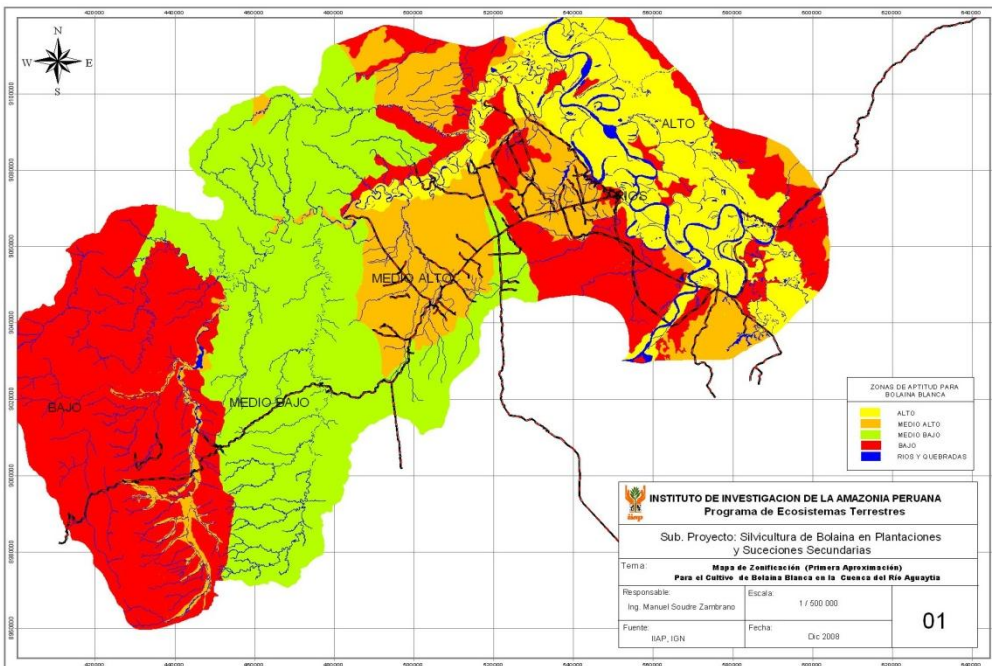


Figura 30: Macrozonificación para boliana en la cuenca del río Aguaytía, Soudre (2008).

Por efectos prácticos se decidió juntar las categorías de alto y medio bajo la categoría genérica de condiciones edáficas favorables y cruzar esta información con los mapas de adecuación climática.

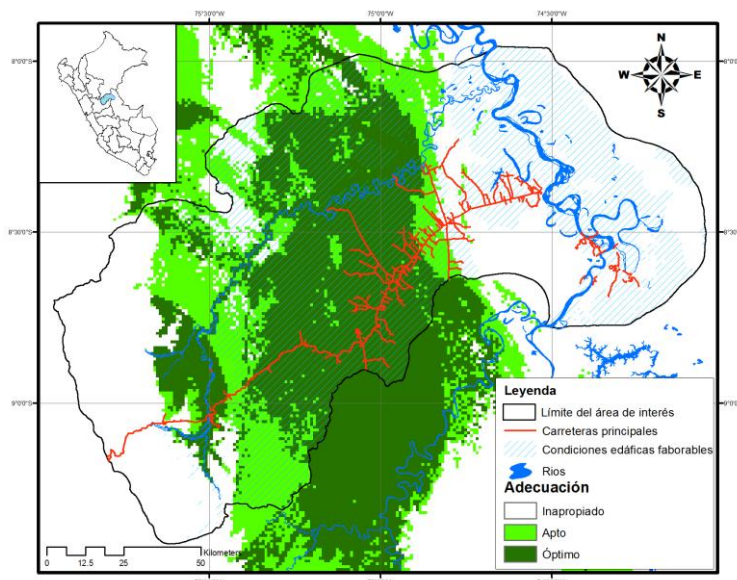


Figura 31: Condiciones edáficas favorables y adecuación climática de la bolina bajo condiciones actuales

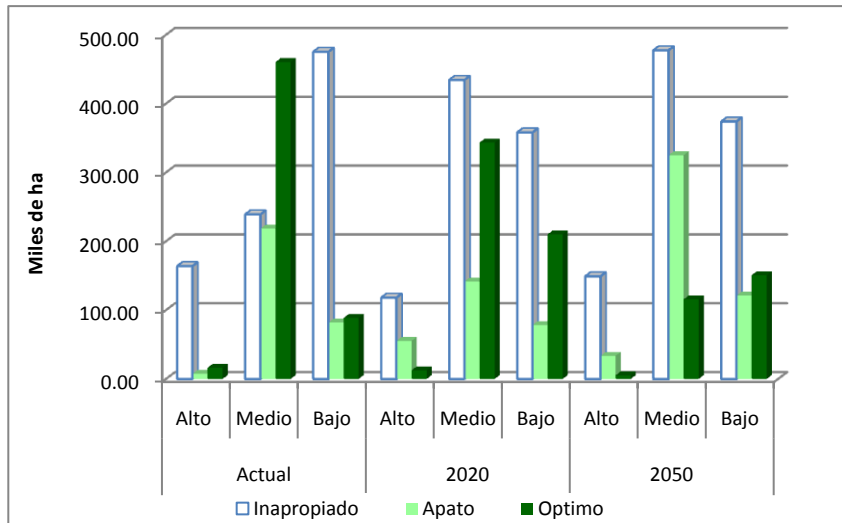


Figura 32: Comparación de adecuación climatológica y condiciones de suelo favorables para la bolaina

Descartando las condiciones inapropiadas tanto edáficas como climáticas y tomando en consideración solo las categorías aptas y óptimas desde un punto de vista climático y altas y media desde un punto de vista edáfico, se observa una disminución de aproximadamente el 19.5% en comparación a la utilización solo de variables climáticas. Al 2020 esta reducción llegara al 34%, mientras que a mediados de siglo esta reducción llegará a 36% (figura 32).

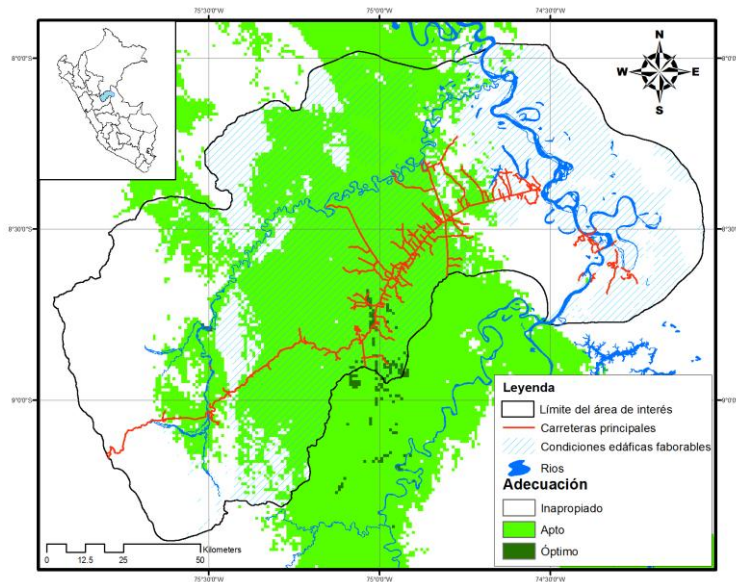


Figura 33: Condiciones edáficas favorables y adecuación climatológica de la capirona bajo condiciones actuales

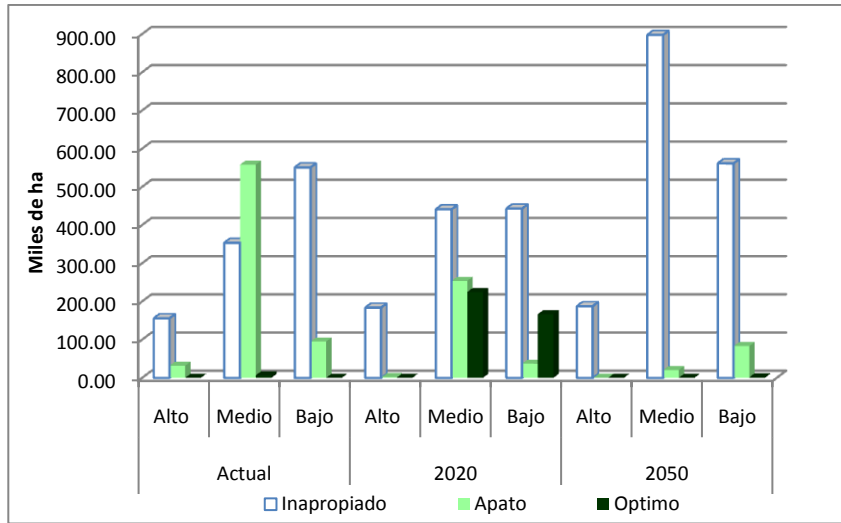


Figura 34: Comparación de adecuación climatológica y condiciones de suelo favorables para la capirona

Las zonas con condiciones edafoclimáticas favorables para la capirona ascienden a 596,202 ha (13% menos que cuando se toma solo condiciones climáticas) para el horizonte actual. El 2020 poco más de 480,000 ha muestran condiciones edafoclimáticas favorables para esta especie, mientras para el 2050 se proyecta una reducción de casi el 80% con respecto al reporte de solo variables climáticas.

5.6 Sistemas agroforestales y cambio climático

A continuación se presentan los resultados del trabajo realizado con los grupos de expertos durante el taller del 12 de marzo en la ciudad de Pucallpa.

Uno de los aspectos discutidos con los colegas fue sobre los impactos que podrían tener los eventos extremos sobre las especies que conforman los sistemas agroforestales más comunes en la cuenca del río Aguaytía. Para esto se les puso algunas referencias tales como la sequía, cambios en el patrón de precipitaciones ya sean estas en cantidad o en desplazamientos de las épocas de lluvia y seca. Así mismo se les propuso pensar en eventos extremos tales como el fenómeno del Niño y/o lluvias de gran intensidad por periodos prolongados de tiempo.

Tabla 9: Principales impactos sobre las especies analizadas

		Sequia	Cambios en la precipitación	Eventos extremos
Cuenca Aguaytía, Perú	<i>Guazuma crinita</i>	Alteración del ciclo fenológico	A mayor precipitación mayor crecimiento y menor densidad de la madera.	El fenómeno del niño incremento la sequía generando incendios y pérdidas de cultivos.
	<i>Calycophyllum spruceanum</i>	Aumento de mortandad Cambios fenológicos Menos regeneración natural Presencia de plagas	Mortandad Erosión del suelo (lavado) Ataque de hongos.	El fenómeno del niño incremento la sequía generando incendios y pérdidas de cultivos.
	<i>Theobroma cacao.</i>	Defoliación. Aborto floral Muerte de la planta	Cambios en la fenología Problemas fitosanitarios Aborto de flores y frutos	El fenómeno del niño se manifiesta mediante la alteración de la época de precipitaciones especialmente durante los meses de enero, febrero y marzo.

Los participantes del taller mencionaron sus preocupación por que eventos tales como sequía y vinculan este fenómeno mortalidad de la planta, cambios en el ciclo fenológico de las especies, incremento de defoliación y también con la aparición de plagas. El cambio en el patrón de precipitaciones tiene y efecto similar ya que no solo es el detalle de la cantidad de lluvia, sino que además es la alteración de las épocas de lluvias. Esto puede ocasionar abortos florales y frutos, desincronización entre estado de floración de la especie y aparición de agente polinizador.

La presencia fenómeno del Niño en las costas peruanas se manifiesta con sequías prolongadas en épocas de lluvias. Esto genera además de los problemas ya descritos, el peligro latente de incendios que son difícilmente controlados por los productores.

Tabla 10: Principales recomendaciones de manejo agroforestal

		Potenciales asociaciones	Plantaciones	Control de plagas y enfermedades
Cuenca Aguaytía, Perú	<i>Guazuma crinita</i>	Cacao Plátano Guaba Tornillo Shihuahuaco Marupa	6 x 6 m Contorno	No requiere
	<i>Calycophyllum spruceanum</i>	Naranja Cacao Cercos vivos Tornillo Pastos	Con coberturas Mejoramiento genético Mayor densidad de siembra Sirve como sombra en potreros y piscigranjas	Mejoramiento genético
	<i>Theobroma cacao.</i>	Ingas Capironas Bolaina Musas Shihuahuaco Tornillo Cedro Caoba Coberturas Commelinaceas Leguminosas		Optimización de las prácticas de manejo agronómico, especialmente el de las podas

6. Discusión

Hay un consenso sobre el impacto del cambio climático en los ecosistemas forestales. En tal sentido es altamente probable que este proceso altere el rango de distribución de las especies nativas y las zonas en las cuales estas pueden desarrollarse como exóticas (Van Zonneveld et al 2009). Así mismo, el cambio climático tendrá efectos negativos, pero también tendrá efectos positivos sobre la distribución de áreas con potencial para el desarrollo de plantaciones forestales (McLaughlin 2002, Rehfeld *et al.* 2002, Jensen 2003). Los cambios negativos se evidenciaron en el desplazamiento de las zonas adecuadas para el desarrollo de las tres especies en estudio, mientras que los cambios positivos pueden verse en el incremento de las áreas con condiciones ambientales favorables a nivel nacional.

6.1 Aspectos metodológicos

La predicción de distribución de especies a través de modelos de nicho ecológico se viene masificando debido a la aparición de herramientas cada vez más amigables para su uso y también a la necesidad de mostrar resultados que puedan abrir la puerta de dialogo entre la academia y los tomadores de decisión. Sin embargo debemos tener en cuenta las limitaciones de nuestros resultados, entender claramente los supuestos sobre los cuales descansa el proceso de modelaje, así como identificar las fuentes de incertidumbre en nuestro trabajo.

Una de las principales críticas para modelos como Maxent, es que utilizan una base de datos para la climatología actual que provienen de un trabajo de extrapolación de información proveniente de estaciones meteorológicas a nivel mundial (Hijmans *et al.* 2005), pero que necesita ser mejorada con mayor información a nivel local. A este hecho se debe agregar que las predicciones de distribución futura se basan en modelos de circulación global, que están a resoluciones muy gruesas y que deben ser sometidas procesos de reducción de resolución o *downscaling* para poder ser de utilidad.

Adicionalmente se encuentra el tema de los requerimientos de suelo. El modelo Maxent no incluye el componente de suelo dentro de las variables que usa para determinar la distribución potencial de las especies. Sin embargo asume las condiciones ambientales en las zonas de colectas y genera modelos probabilísticos en función de estos donde implícitamente y por selección natural una especie nativa se desarrolla en lugares con condiciones de clima y suelo favorables para su crecimiento. Esto no se aplica a las plantaciones como es el caso del cacao comercial.

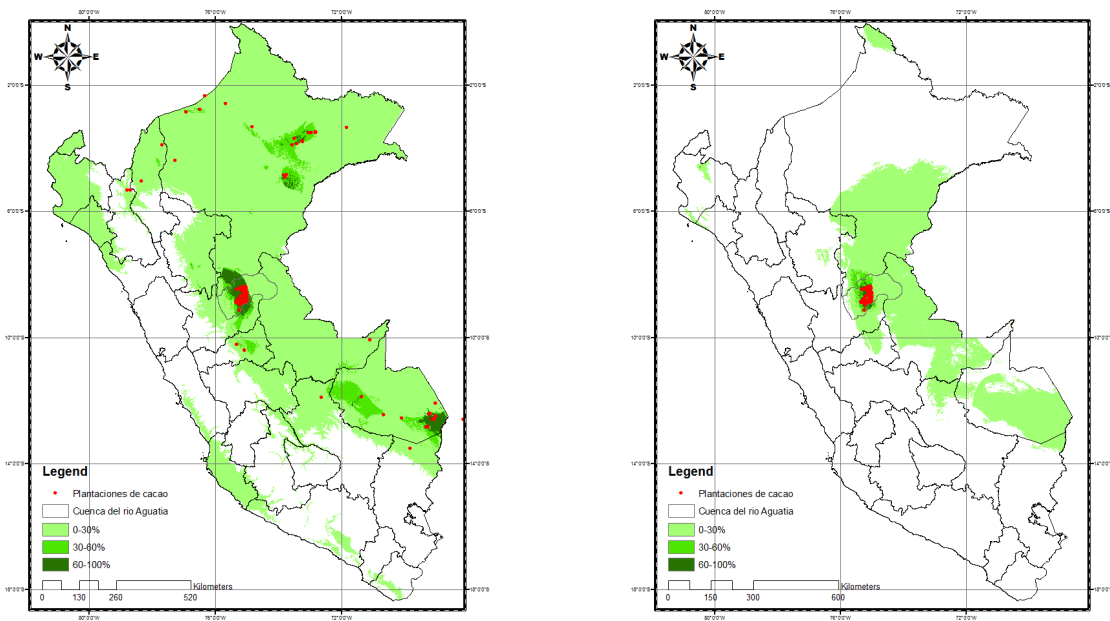
Un tema pendiente para los modelos de nicho climático es la validación de los resultados. Mientras que otros argumentan que estos sobre estiman el impacto del cambio climático sobre las especies forestales (Van Zonneveld et al. 2009). Existen técnicas que pueden ser aplicadas, pero que requieren de una base de datos muy bien organizada en el cual se pueda tener evaluaciones de largo periodo de las especies en estudio bajo condiciones naturales y en plantaciones (Zavaleta, 2006). Debido a la falta de ese tipo de información, se decidió que la mejor forma de validar los resultados al mismo tiempo de generar espacios de discusión mientras introducimos en la agenda el tema de cambio climático y su impacto en la región sería a través de una consulta con expertos en el tema.

Se puede esperar que la capacidad de las especies forestales para persistir sobre su locación actual bajo nuevas condiciones de clima sea la clave para su supervivencia frente al cambio climático. Sin embargo, las especies forestales están limitadas en su capacidad de cambiar a otras zonas debido a su ciclo de vida (Van Zonneveld et al. 2009). Esto es lo que ocurriría en la cuenca del río Aguaytía donde se prevé que las condiciones climáticas favorables para las especies forestales se desplacen hacia las partes altas de la cuenca.

A continuación se presentan algunas reflexiones surgidas durante el desarrollo del trabajo y el uso de Maxent.

6.1.1 Sensibilidad al tamaño y la distribución de los puntos muestreados

Maxent es sensible al tamaño y la distribución geográfica de las muestras. En la figura 30 se aprecia los puntos tomados predecir la distribución de cacao bajo condiciones de climatología actual. Las muestras fueron tomadas en diferentes departamentos tales como Loreto, Madre de Dios, Huánuco, entre otros. Mientras que a la derecha podemos observar la predicción para la distribución de zonas con condiciones climatológicas para la producción de cacao con base en puntos tomados solo en la cuenca del río Aguaytía. En el segundo caso se puede ver una sub estimación de la capacidad del modelo para predecir la capacidad de distribución del cacao.



Parcelas de cacao de PDA, ACAPTA y
Global Biodiversity Information Facility

Parcelas de cacao de PDA y ACAPTA

Figura 35: Sensibilidad del modelo al tamaño y distribución de las muestras

6.2 Selección de software

Durante la primera reunión que tuvimos con los especialistas en sistemas de información geográfica y modelaje de cambio climático de CIAT, tuvimos la oportunidad de conocer algunos programas que se ajustan a nuestras necesidades de investigación. A parte de MaxEnt, EcoCrop era un programa que se puede utilizar para predecir la distribución de especies en función al cambio de parámetros climáticos. En tal sentido se hizo una prueba para con los requerimientos climatológicos de bolaina para evaluar la capacidad de predicción de este programa. En la figura 18 se muestra el resultado de la predicción de EcoCrop para bolaina. En este caso se usaron los parámetros de precipitación y temperatura descritos en la Tabla 3: Requerimientos climáticos de las especies seleccionadas para la cuenca Aguaytía, Perú

Los resultados que se consiguen con EcoCrop son muy gruesos y de menor calidad que MaxEnt.

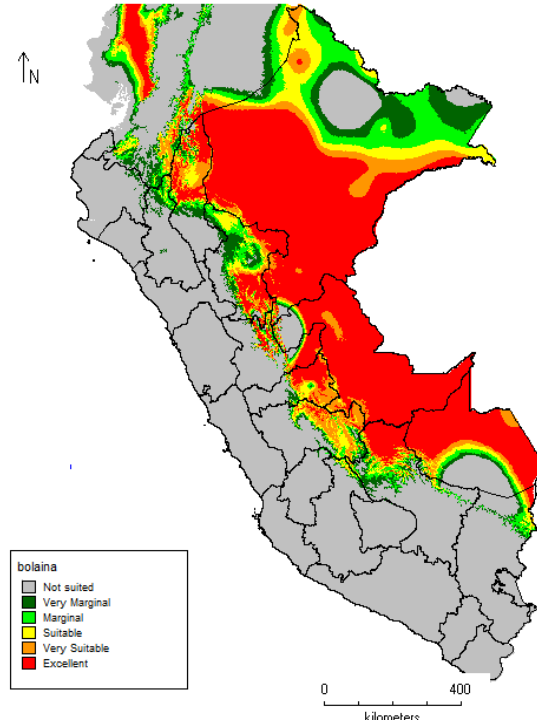


Figura 36: Resultados de la predicción de condiciones climáticas actuales para el desarrollo de boliana blanca usando EcoCrop

Los datos de colectas de las especies nos pueden dar información valiosa respecto a las condiciones ambientales en las cuales ellas se desarrollan, y esto puede ser un insumo importante para usar otros modelos, tales como Ecocrop.

6.3 Sensibilidad a la reclasificación

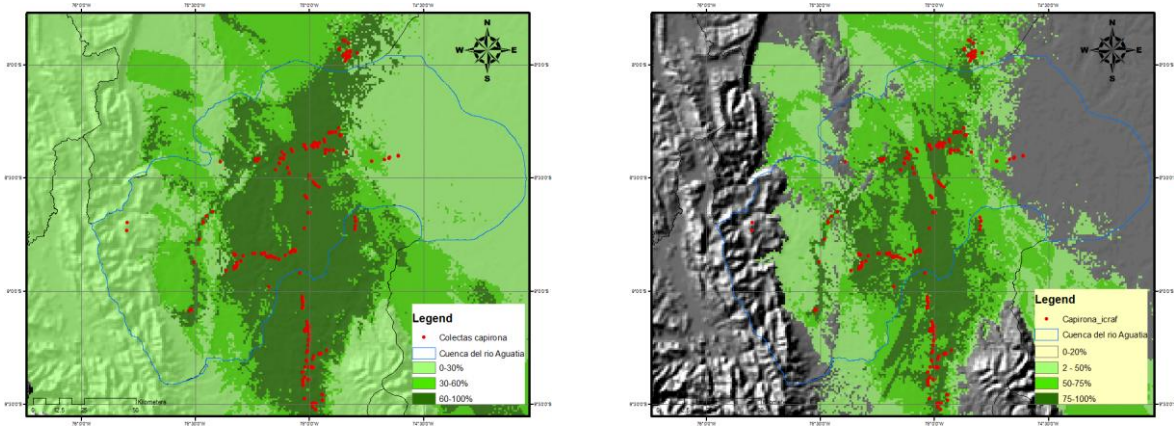
Los resultados de MaxEnt es un mapa de probabilidad de la distribución de una especie según las condiciones climatológicas de la zona de interés. Esta probabilidad va de 0 a 1. De nuestra habilidad de reclasificar estas probabilidades depende mucho los resultados que presentaremos y su discusión. Así se optó por la decisión de reclasificar los resultados en:

Inapropiadas	:	0-0.00001%
Marginales	:	0.00001-30%
Aptas	:	30-60%
Óptimas	:	60-100%

Sin embargo en ejercicios de prueba se usó la siguiente reclasificación:

Inapropiadas	:	0-20%
Marginales	:	20-50%
Aptas	:	50-75%
Óptimas	:	75-100%

Esto nos dio resultados y zonas completamente diferentes. A continuación se esquematiza la sensibilidad mediante cambios en la reclasificación:



Usada en el trabajo

Inapropiadas	:	0-0.00001%
Marginales	:	0.00001-30%
Aptas	:	30-60%
Óptimas	:	60-100%

Pruebas

Inapropiadas	:	0-20%
Marginales	:	20-50%
Aptas	:	50-75%
Óptimas	:	75-100%

Figura 37: Sensibilidad a la reclasificación de los resultados de MaxEnt

7. Referencias

- Álvares, L; Rios, S. 2007. Evaluación económica de parcelas de regeneración natural y plantaciones de bolaina blanca “Guazuma crinita”, en el departamento de Ucayali. Documento de trabajo. Programa de Ordenamiento Ambiental. IIAP. Iquitos, Perú. 52p
- Benito, B; Peñas, J. (2007): “Aplicación de modelos de distribución de especies a la conservación de la biodiversidad en el sureste de la Península Ibérica”, *GeoFocus* (Artículos), nº 7, p. 100-119, ISSN: 1578-5157
- Brako, L; Zarucchi, J. 1993. Catálogo de las Angiospermas y Gimnospermas del Perú. Missouri Botanical Garden. Segunda reimpresión 1996. 1286 p
- de Rouw, A. 1995. The fallow period as a weed-break in shifting cultivation (tropical wet forests). *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 54:31-43.
- Encarnación, F. 1983. Nomenclatura de las especies forestales comunes en el Perú. Proyecto PNUD/FAO/81/002. Trabajo N° 7. Lima, Perú. 149p
- Fujisaka, S; Escobar, G; Veneklaas, E. 2000. Weedy forest and fields: Interaction of colonists' land use and plant community and diversity in the Peruvian Amazon. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 78:175-186.
- Hijmans, R; Cameron, S; Parra, J; Jones, P; Jarvis, A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land area. *International journal of climatology*. 25: 1965-1978
- IIAP – CTAR Ucayali. 2000. Zonificación Ecológica Económica de la Cuenca del Río Aguaytía. Gobierno Regional de Ucayali – IIAP. Iquitos 121 p + mapas
- IICA. 1995 Preservación del Bosque Amazónico: Una Estrategia Común en Base a la Estabilización de la Agricultura Migratoria y al Manejo Sostenible del Bosque. PROCITROPICOS (Programa Cooperativo de Investigación y Transferencia de Tecnología para los Trópicos Suramericanos), Documentos para el Segundo Seminario-Taller Regional para la Elaboración del Proyecto. Pucallpa, Peru.
- IICA. 2006. Protocolo estandarizado de oferta tecnológica para el cultivo del cacao en el Perú. IICA. 78p
- INIA. 1996. Manual de identificación de especies forestales de la Sub-Región Andina, INIA – OIMT. PD 150/91. Lima, Perú. 489 p.
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation & Vulnerability Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). McCarthy, J. Canziani, O. Leary, A. Dokken, D. y S. White, K. Eds. Cambridge University Press, UK. 1000 p.

- IPCC. 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation & Vulnerability Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Parry, M. Canziani, O. Palutikof, J. Van der Linden, P. y Hanson, C. Eds. Cambridge University Press, UK. 976p
- Loker, WM. 1993. Medio Ambiente y Agricultura en la Amazonía Peruana: Un Experimento Metodológico. p. 13 – 25. In W.M. Loker and S. Vosti. *Desarrollo Rural en la Amazonía Peruana*. CIAT/IFPRI, Cali, Colombia
- Phillips, S; Anderson, R; Schapire, R. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, Vol 190/3-4 pp 231-259
- Phillips, S; Dudik, M. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*. 3: 161-175
- Sotelo, C; Weber, J. 1997. Priorización de especies arbóreas para sistemas agroforestales en la selva baja del Perú. *Agroforestería en las Américas* 14: 12-17
- Soudre. M. 2006. Silvicultura de la boliana en plantaciones y sucesiones secundarizas en Ucayali. IIAP.
- Spichiger, R.; Meroz, J.; Loizeau, P.A; Stutz de Oretga, L. 1990. Contribución a la flora de la Amazonía peruana; los árboles del arborétum Jenaro Herrera. V 2. Conservatorio y Jardín Botánicos de la ciudad de Ginebra, Organización Suiza para el Desarrollo y la Cooperación, Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana. Ginebra, Suiza. 565 p.
- Van Zonneveld, M; Koskela, J; Vinceti, E; Jarvis, A. 2009. Impacts of climate change on the distribution of tropical pines in southeast Asia. *Unasylva* 60: 231/232 pp 24-29
- White, D S; Labarta, R L; Leguia E J. 2005. Technology adoption by resource-poor farmers: considering the opportunity costs of peak-season labor. *Agricultural Systems*. 85(2):183-201
- Zavaleta, E. 2006. Shrub establishment under experimental global changes in a Californian grassland. *Plant Ecology* 184, 53–63.

Anexos

Tabla 11: Colectas de *G. crinita* y *C. spruceanum* durante 1996

Sitio de colecta	Bolaina	Capirona
Shukushuyaku	35	35
Lagunas	35	35
Barranca	35	35
Pastaza	35	35
Jenaro Herrera	35	35
Tamshiyacu	40	35

Mazan	35	35
Pevas	35	35
Atalaya	35	40
Tiruntan	35	35
Von Humbolt	35	35

Fuente: ICRAF

Tabla 12: Colectas de *G. crinita* durante 1998

Localidad o sitio	Bolaina	Capirona (98s)	Capirona (98f)
Nueva Requena-Rio	17	39	13
Quebrada Neshuya (CFB.Km. 49,5)	13	5	2
Quebrada Tahuayo(CFB.Km.72)	11	5	1
Curimana-Rio	20	10	4
Aguaytia-Rio	19	6	4
Quebrada Yurac (Aguaytia)	3	7	4
Puerto Inca	18	21	7
Von Humboldt	17	10	10
Macuya	49	43	9
San Alejandro	17	50	11
CFB. hasta Km. 72	7	7	3
Carretera Nueva Requena	4	0	1
Carretera a Curimaná	7	6	3
Carretera a Tournavista	7	3	5

Fuente: ICRAF