



## PROGRAMA CENTROAMERICANO DE GESTION INTEGRAL DE LA ROYA DEL CAFÉ - PROCAGICA

ESTABLECIMIENTO DE UNA RED REGIONAL DE ALERTA TEMPRANA PARA LA ROYA DEL CAFÉ

Mapeo de la incidencia de la roya del café basado en las condiciones climáticas:

Efectos del cambio climático en la incidencia máxima de la roya del café en Centroamérica y República Dominicana



Autores: Sergio Vilchez Mendoza, Fernando Casanoves, Edwin Treminio y Jacques Avelino

Agosto, 2020

## Introducción

La roya del café es una enfermedad provocada por el hongo *Hemileia vastatrix*, distribuida en todas las regiones productoras de café y atacando a diferentes especies del género *Coffea*. Esta enfermedad es de principal importancia en el cultivo del café dado que puede provocar pérdidas de entre un 20 y un 80 % de la producción (Shiomi *et al.* 2006) y generar altos costos de producción por la implementación de las medidas de control. Una vez que los productores aprendieron a controlar la roya con el uso de fungicidas se creyó que se podría mantener bajo control (Villarreyna-Acuña 2014). No obstante, en 2008 en Colombia se presenta una epidemia mostrando el poder devastador de la enfermedad (Avelino *et al.* 2015); esta epidemia se presenta en Centroamérica en los años 2012-2013, y en Ecuador y Perú su aparición se muestra en el año 2013 (Avelino *et al.* 2015). En Centroamérica las pérdidas causadas por la roya en los años de alta incidencia se estimaron en un 20% (Avelino y Rivas 2013), ocasionando problemas como abandono del cafetal y desempleo.

Las fases de la enfermedad inician desde que el hongo penetra los estomas de las hojas bajo condiciones de temperatura de 22 °C y mojadura de las hojas. El proceso de incubación tiene lugar con temperaturas entre 19 y 26 °C. Este periodo puede ocurrir entre los 17 y 42 días después de la germinación. La esporulación puede durar entre 26 a 62 días con temperaturas de 17 a 26 °C. En general los síntomas son visualmente detectables desde el periodo de incubación, pero más obvios cuando está ocurriendo la esporulación. La dispersión de la roya se lleva a cabo por la producción de uredosporas en grandes cantidades que pueden ser transportadas por el viento, la lluvia y por las personas que visitan el cafetal principalmente durante la cosecha.

La aparición de la roya en los últimos años como una epidemia con efectos devastadores parece estar relacionada a una combinación de factores económicos y meteorológicos (Avelino *et al.* 2015). Los periodos de incubación y de latencia pueden sufrir aumentos o disminuciones en sus tiempos de desarrollo dependiendo de las condiciones climáticas (Rivillas *et al.* 2011).

Recientes estudios han evidenciado cómo los cambios del clima a futuro tendrán efectos negativos en el cultivo de café (Assad *et al.* 2004, Gay *et al.* 2006, Ghini *et al.* 2008, Laderach *et al.* 2010, Imbach *et al.* 2010). Se esperan cambios en las distribuciones actuales del cultivo del café y por consiguiente los cambios de distribución y afectaciones a las plagas y enfermedades asociadas al

cultivo, así como a la diversidad benéfica asociada (Ghini *et al.* 2010, Imbach *et al.* 2010, Jaramillo *et al.* 2011, Vital *et al.* 2019, Chain-Guadarrama *et al.* 2019).

Para la distribución espacial de plagas y enfermedades, así como para la biodiversidad, los modelos predictivos por el clima o modelos de envolturas climáticas (nichos climáticos) se han convertido en métodos robustos para evaluar los posibles impactos del cambio climático (Guisan y Theurillat 2000). Los enfoques de modelación basados en la correlación empírica entre las plagas, enfermedades o biodiversidad con factores climáticos no tienen limitación práctica para estudiar la influencia del cambio climático sobre la distribución de estos organismos. Es importante la influencia de otros factores no climáticos como el manejo y características biofísicas de las parcelas en la incidencia de la roya (Reina *et al.* 2019).

Recientes trabajos sobre la distribución geográfica de la roya del café basados en escenarios de climas futuros han utilizado distintos ajustes de modelos de regresión que predicen el número de días para iniciar la esporulación en función del máximo promedio de temperatura y el mínimo promedio de temperatura (Ghini *et al.* 2010, Alfonsi *et al.* 2019). Una alternativa para el mapeo es el uso de modelos de interpolación basados en la posición geográfica de las parcelas; esto puede ser realizado a través de modelos de patrones de puntos (p.e., kriging simple o convencional).

En este trabajo se propone predecir la distribución geográfica de la roya del café en Centroamérica y República Dominicana utilizando variables climáticas. Para esto nos planteamos tres objetivos basado en dos enfoques: 1) Evaluar la relación de la incidencia de la roya del café con las variaciones del clima en Centroamérica y República Dominicana, 2) Evaluar la relación de las variables bioclimáticas sobre la incidencia máxima anual de la roya del café y 3) predecir los posibles cambios de la incidencia máxima anual de la roya del café bajo escenarios de cambio climático en un horizonte 2040-2060.

## *Metodología*

### *Área de estudio*

La investigación se llevó a cabo en las regiones cafetaleras de Centroamérica, específicamente los paisajes del Salvador, Honduras, Nicaragua, Panamá (Figura 1) y en República Dominicana.

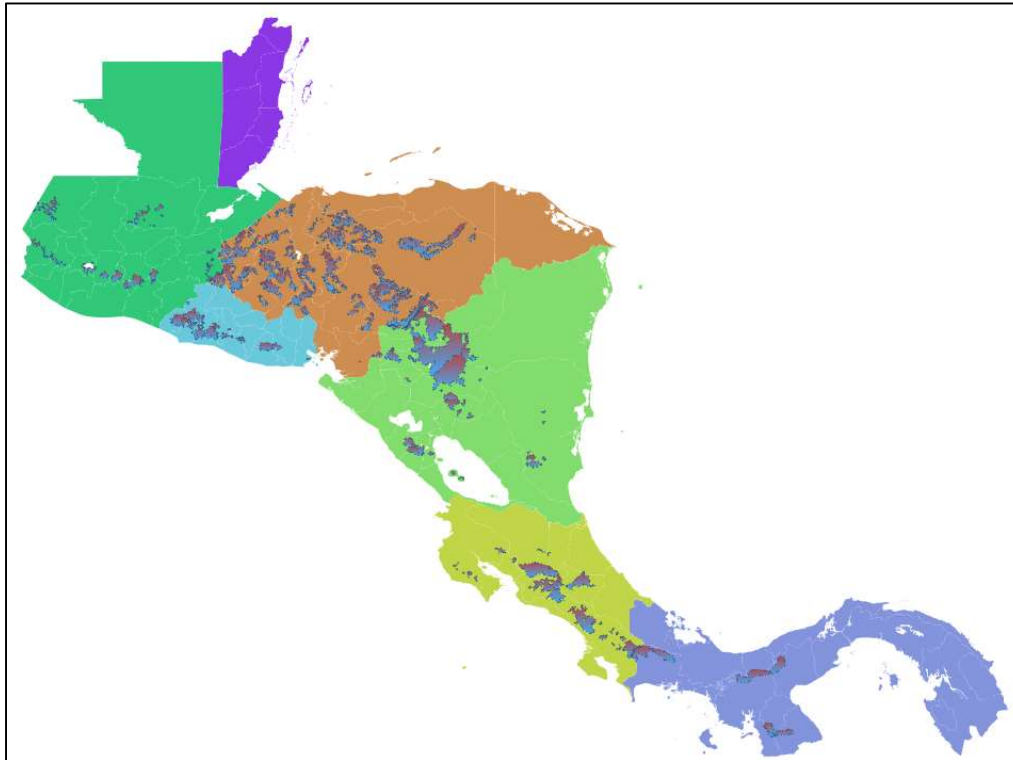


Figura 1. Regiones cafetaleras de Centroamérica.

Las regiones cafetaleras de Centroamérica varían en altitud de los 300 hasta los 1800 m s.n.m. Por consiguiente, se encuentran distribuidas en distintas regiones climáticas (Figura 2). Las precipitaciones oscilan entre los 1200 y los 3000 mm anuales, las zonas pueden variar en estacionalidad de la época lluviosa, siendo las regiones bajas más estacionales y de mayor área del cultivo café.

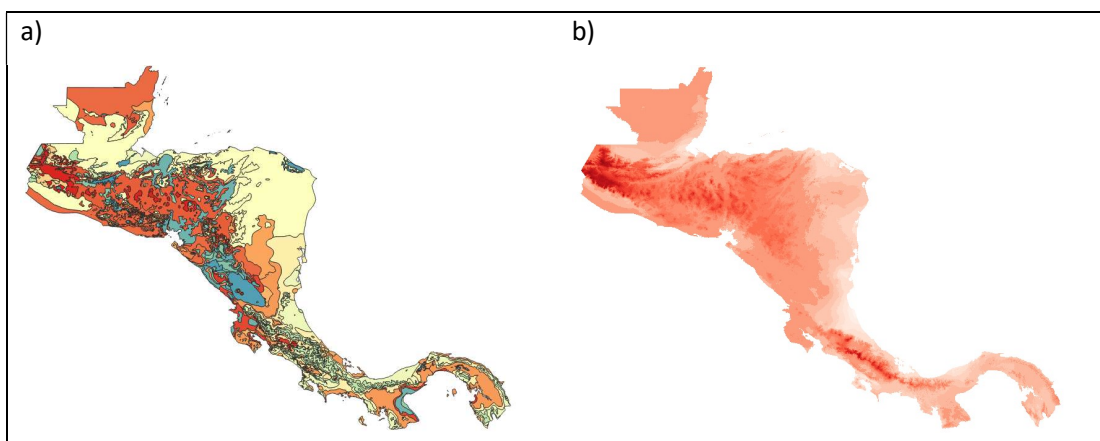


Figura 2. a, Zonas de vidas de Centroamérica, basado en la clasificación de Holdridge. b, Distribución bioclimática de Centroamérica.

## Variables

Para el presente trabajo utilizó la incidencia de roya registrada en los programas de monitoreo de la enfermedad para alerta temprana en los países. Se cuenta con un base de datos de 36000 registros entre los años 2014 y 2019 (Cuadro 1).

Cuadro 1. Número de parcelas por mes y año monitoreadas en los programas que ejecutan los paisajes para la alerta temprana de la incidencia de roya

| Pais        | Año  | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo | Junio | Julio | Agosto | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre |
|-------------|------|-------|---------|-------|-------|------|-------|-------|--------|------------|---------|-----------|-----------|
| El Salvador | 2017 |       |         |       |       | 74   | 138   | 186   | 199    | 171        | 203     | 196       | 189       |
|             | 2018 | 186   | 182     | 162   |       | 206  |       |       |        |            |         |           |           |
| Honduras    | 2016 |       |         | 16    | 19    | 809  | 834   | 816   | 776    | 790        | 743     |           |           |
|             | 2017 |       |         | 211   | 724   | 655  | 659   | 729   | 728    | 692        | 707     | 678       | 692       |
|             | 2018 | 713   | 686     | 676   | 655   | 693  | 695   | 710   | 717    | 700        | 729     | 704       | 671       |
|             | 2019 | 619   | 563     | 688   | 733   | 747  | 684   | 765   | 768    |            |         |           |           |
| Nicaragua   | 2015 | 81    | 71      | 84    | 80    | 86   | 89    | 96    | 114    | 117        | 108     | 107       | 105       |
|             | 2016 | 107   | 101     | 104   | 106   | 105  | 156   | 144   | 126    | 133        | 124     | 135       | 126       |
|             | 2017 | 130   | 130     | 133   | 133   | 140  | 128   | 126   | 125    | 129        | 134     | 135       | 136       |
|             | 2018 | 130   | 132     | 128   | 125   | 113  | 88    | 119   | 128    | 133        | 118     | 118       | 113       |
|             | 2019 | 125   | 155     | 151   | 164   | 170  | 150   | 131   | 15     |            |         |           |           |
| Panamá      | 2015 |       |         | 3     | 9     | 11   | 23    | 25    | 19     | 29         | 20      | 26        | 7         |
|             | 2016 | 31    | 28      | 18    | 47    | 47   | 36    | 37    | 46     | 47         | 35      | 14        | 36        |
|             | 2017 | 30    | 18      | 18    | 31    | 32   | 35    | 18    | 20     | 22         | 21      | 16        | 4         |
|             | 2018 | 1     | 5       |       | 7     |      |       |       |        |            |         |           |           |

## Variabilidad climática y su relación con la incidencia de la roya del café

Para modelar la variabilidad climática utilizamos todos los registros de roya de los programas de monitoreo y asociamos distintas variables climáticas a cada registro de incidencia de roya en el tiempo. Para evaluar la relación de las variables climáticas con la incidencia de la roya del café construimos una base de datos de clima utilizando la información disponible en la plataforma de la NASA. Este es un proyecto de meteorología de la superficie y energía solar (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>) que brinda datos científicos de series de tiempo a través de su programa de investigación (Earth Science research program) y los sistemas de satélites que proporcionan datos importantes de los procesos climáticos en la tierra. La NASA argumenta que

estos datos climáticos basados en modelos y satélites son lo suficientemente precisos como para proporcionar datos meteorológicos fiables en regiones donde las mediciones climáticas en la superficie son escasas o inexistentes. La resolución es de 40 km<sup>2</sup>.

Las variables climáticas seleccionadas provienen de las series de tiempo de *SSE-Rewable Energy* donde se extrajeron las variables de velocidad del viento (rango, mínimo, máximo, y promedio diario) y de la serie de tiempo de *Agroclimatology*; se extrajo la precipitación, temperatura y humedad relativa (rango, mínimos, máximos y promedio de precipitación diaria).

Dado que la cantidad de datos a descargar se construyó un algoritmo para paralelizar las descargas de manera automática y eficiente. El script se encuentra en: la página de github SVMendoza download-NASA-Prediction-Of-Worldwide-Energy-Resources-for-a-single-point-

#### *Procesamiento de las variables climáticas*

Dado que la lesión de roya en la hoja de la planta pasa por un proceso de colonización, consideramos utilizar la información del clima 10, 15, 20, 25, 30 y 35 días antes del registro de la incidencia. Para esto se construyó una rutina que extrajera las series de tiempos descargadas de la página de la NASA para la construcción de las variables. En total se construyeron 96 variables climáticas.

#### *Modelación de la incidencia de roya*

Para modelar la incidencia de roya por las variables climáticas, primero a la serie de tiempo de los registros de incidencia de roya evaluados en los programas de monitoreo de Centroamérica y República dominicana se les realizó lo siguiente: descontar el efecto del genotipo de los cafetales monitoreados sobre la incidencia de la roya, utilizando la variable resistencia estimada por Treminio (2019) a través del ajuste de un modelo beta binomial, ya que era importante considerar la sobre dispersión de los datos. Los residuos (error del modelo) del modelo beta binomial fueron considerados como la variable a relacionar con las variables climáticas.

Con las estimaciones de las variables climáticas y la construcción de la variable de incidencia (residuos del modelo BB) se procedió a ajustar un modelo de regresión múltiple utilizando el algoritmo randomForest (Liaw y Wiener, 2002). La estrategia de modelación consistió en ajustar un modelo global con todas las variables climáticas (96 variables) realizando validación cruzada de manera iterativa (se ajustaron 100 modelos combinando los conjuntos de datos de entrenamiento

y validación). Además, se ajustó un árbol de clasificación categorizando los residuos del modelo en tres grupos (baja, media y alta incidencia) con ayuda de un análisis de conglomerados. Con estos modelos ajustados se seleccionaron las variables de mayor importancia en la estimación de la incidencia y se excluyeron aquellas variables que no aportaban a la variación explicada sin perder variabilidad.

Finalmente, se ajustó un modelo final con aquellas variables más importantes y se evaluó su desempeño a través de validación cruzada. Este modelo permite realizar pronósticos de la incidencia de la roya en las parcelas evaluadas y en áreas de café donde no han sido evaluadas con un error de predicción asociado.

#### *Respuesta del máximo de roya del café a variables bioclimáticas*

Para responder al objetivo principal de la respuesta de la incidencia de la roya del café al cambio climático, procedimos a utilizar las variables bioclimáticas que son ampliamente usadas en ecología para evaluar patrones de distribución de las especies. Las variables bioclimáticas fueron descargadas de la página de WorldClim ( <https://www.worldclim.org/data/index.html> ) que es una base de datos meteorológicos y climáticos globales de alta resolución. Además, tienen disponible las variables bioclimáticas proyectadas bajo los distintos escenarios de cambio climático RCP (representative concentration pathways) en alta resolución.

Dado que no es posible modelar la serie de tiempo de la roya del café de los programas de monitoreo se optó por utilizar el máximo de roya registrado por parcela como la variable a modelar. Previamente se ajustó un modelo beta binomial con el máximo registrado de incidencia y las categorías de resistencia a la roya para descontar el efecto del genotipo. Los residuos del modelo fue la variable a modelar con las variables bioclimáticas.

Al igual que el modelo de variabilidad se ajustó un modelo de árboles de regresión utilizando randomForest (Liaw y Wiener, 2002). Se evaluó el desempeño del modelo ajustado a través de validación cruzada iterando 100 modelos. Aquí no optamos por reducir el número de variables dado que es computacionalmente manejable y las variables que explican poco no afectan el desempeño del modelo. Al final se mapeó la incidencia de roya para toda Centroamérica y República dominicana.

### Escenarios climáticos

Con el modelo ajustado del máximo de roya y las variables bioclimáticas se procedió a estimar la incidencia máxima anual de la roya bajo dos escenarios de cambio climático, RCP2.6 y RCP4.5 (Trayectorias de Concentración Representativas), estos son escenarios optimistas bajo su forzamiento climático (2.6 W m<sup>2</sup> y 4.5 W m<sup>2</sup>). El horizonte de tiempo utilizado fue entre 2041 y 2060 (2050). Cada escenario está compuesto por nuevos modelos de circulación global.

### Procesamiento de las predicciones

Para evaluar la respuesta potencial de la roya del café a los escenarios de forzamiento climático, se procedió a estimar la probabilidad de cambio de cada pixel (resolución 1 km<sup>2</sup>) de realizar un aumento, disminución o no cambio, con respecto al valor de incidencia de la roya actualmente. Esta probabilidad permite tener un grado de certeza de que la mayoría apuntan en la misma dirección. El IPCC recomienda un umbral de 0.66.

Todos los análisis y las figuras fueron desarrolladas en el lenguaje de programación R 3.6.3 (R Core Team, 2019). Para el procesamiento de las bases de datos fue utilizada la librería *data.table* (Dowle and Srinivasan, 2019), para el manejo de raster la librería *raster* (Hijmans, 2019), para el ajuste de los modelos beta binomial la librería *VGAM* (Yee, 2019), para los modelos de predicción *randomForest* (Liaw and Wiener (2002) y *ggplot2* (Wickham, 2016) para las figuras.

## Resultados

### Variabilidad climática

Arboles de regresión: El modelo encontró que solamente 23 variables climáticas explican el 43.6% de la variación de la incidencia de la roya. La variable que mayores pesos registraron fueron las relacionadas a la velocidad del viento medidas entre 25 y 30 días antes del registro de la incidencia; la variable de humedad relativa medida 30 días antes también tiene un aporte en la varianza explicada (Figura 3).



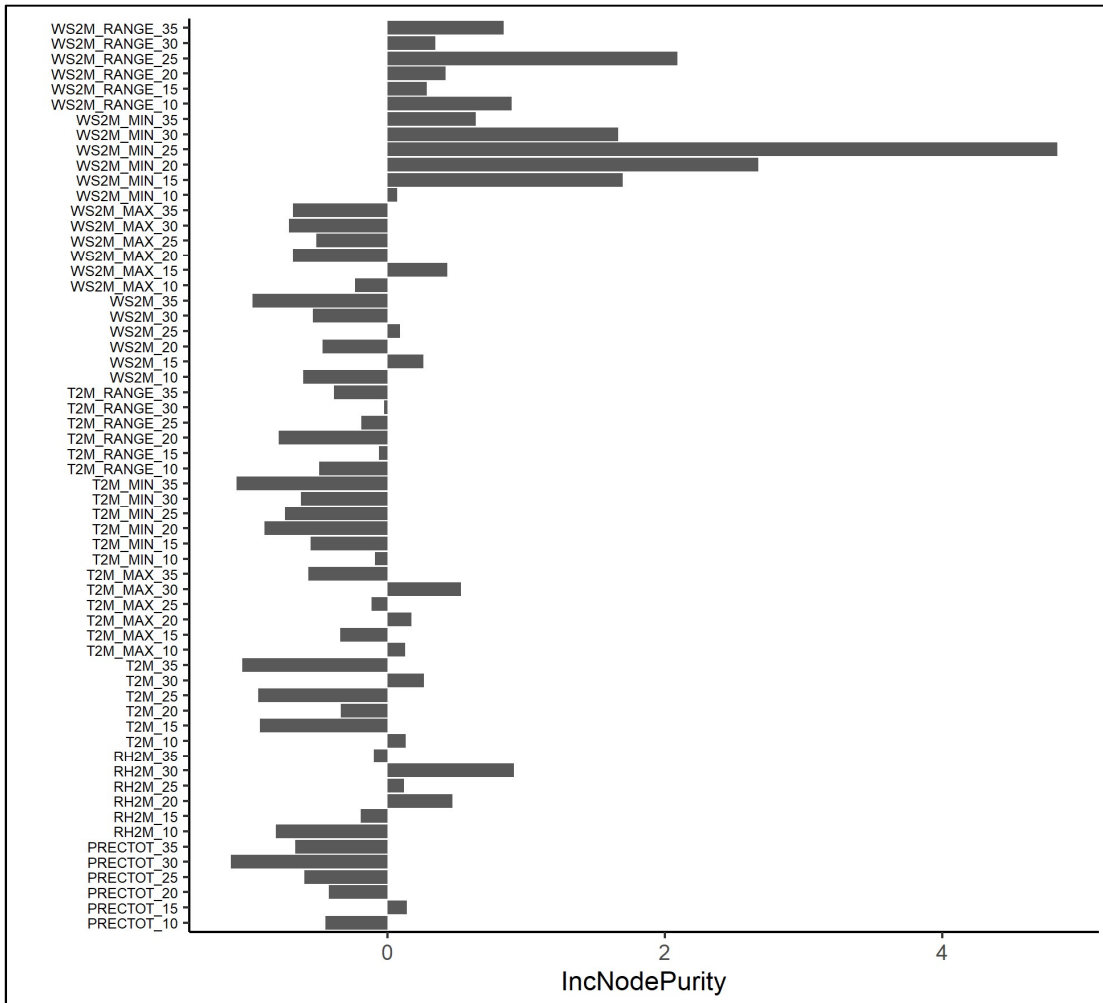


Figura 3. Variables climáticas de mayor importancia en explicar la variación de la incidencia de la roya. PRECTOT = precipitación total, T2M = temperatura, RH = humedad relativa, WS2M = velocidad del viento. Los valores del eje X corresponden al índice de impureza de los nodos estandarizados a un valor Z-normal. Por lo tanto, valores superiores a cero indican que son variables que tienen una importancia relativa superior a la media del índice.

### Arboles de clasificación

Al utilizar la incidencia de la roya en cinco categorías ordinales (-1,0,1,2,3) el error asociado a la clasificación es de 28% en promedio. Sin embargo, las categorías por arriba de la media (clase = 0) presentan errores entre 60 y 70. Las variables de mayor importancia en este modelo son variables de temperatura, precipitación y viento medidos entre 15 y 30 días antes del registro de la incidencia (Figura 4).

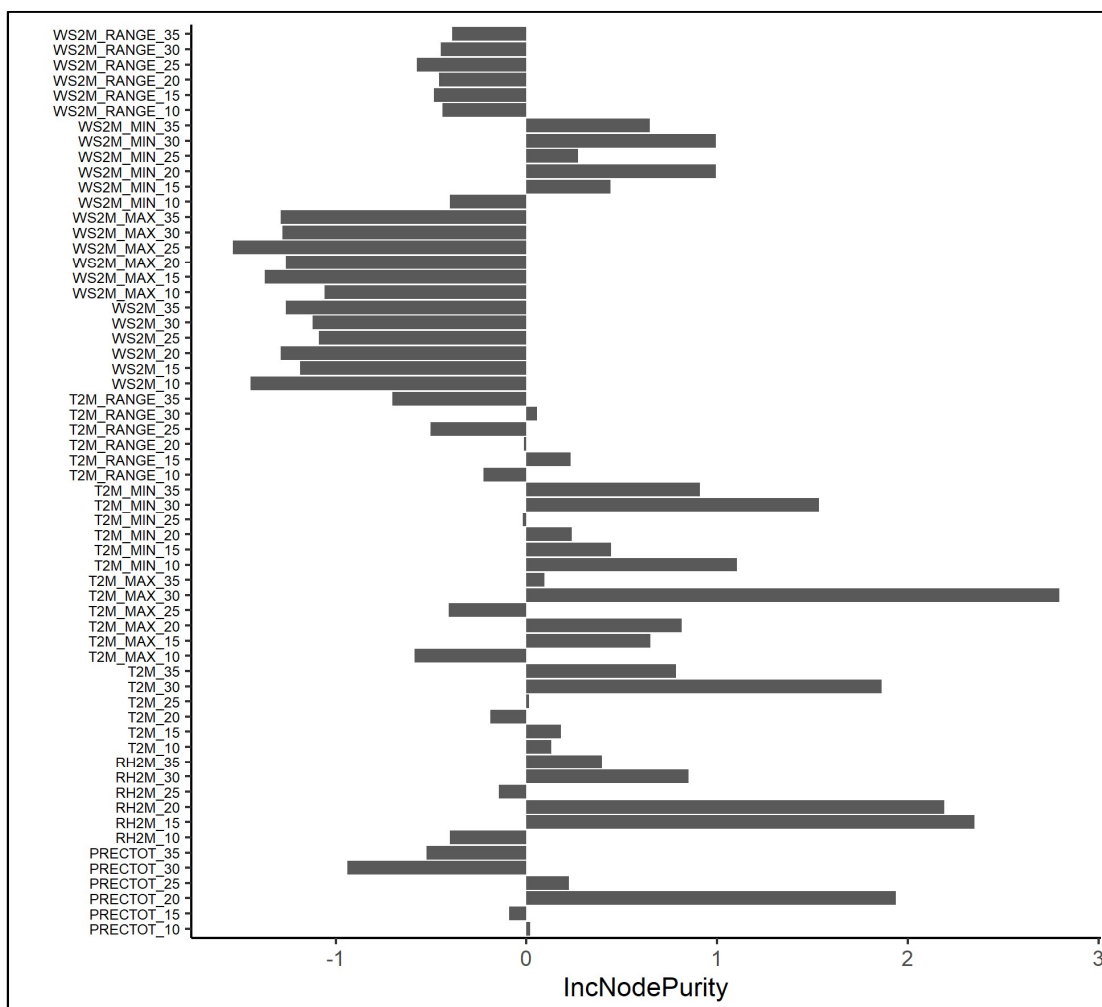


Figura 4. Variables climáticas de mayor importancia en explicar la clasificación de la incidencia de la roya. PRECTOT = precipitación total, T2M = temperatura, RH = humedad relativa, WS2M = velocidad del viento. Los valores del eje X corresponden al índice de impureza de los nodos estandarizados a un valor Z-normal. Por lo tanto, valores superiores a cero indican que son variables que tienen una importancia relativa superior a la media del índice.

*Mapeo de la incidencia de la roya utilizando variables bioclimáticas*

En general en todos los países los registros de máximos de incidencia de la roya fueron entre cero incidencias hasta 100% de incidencias, la mayor concentración de incidencia se encuentra hasta el 25%, contrario a República Dominicana que tiene datos de incidencia máximas reportadas hasta el 75% (Figura 5).

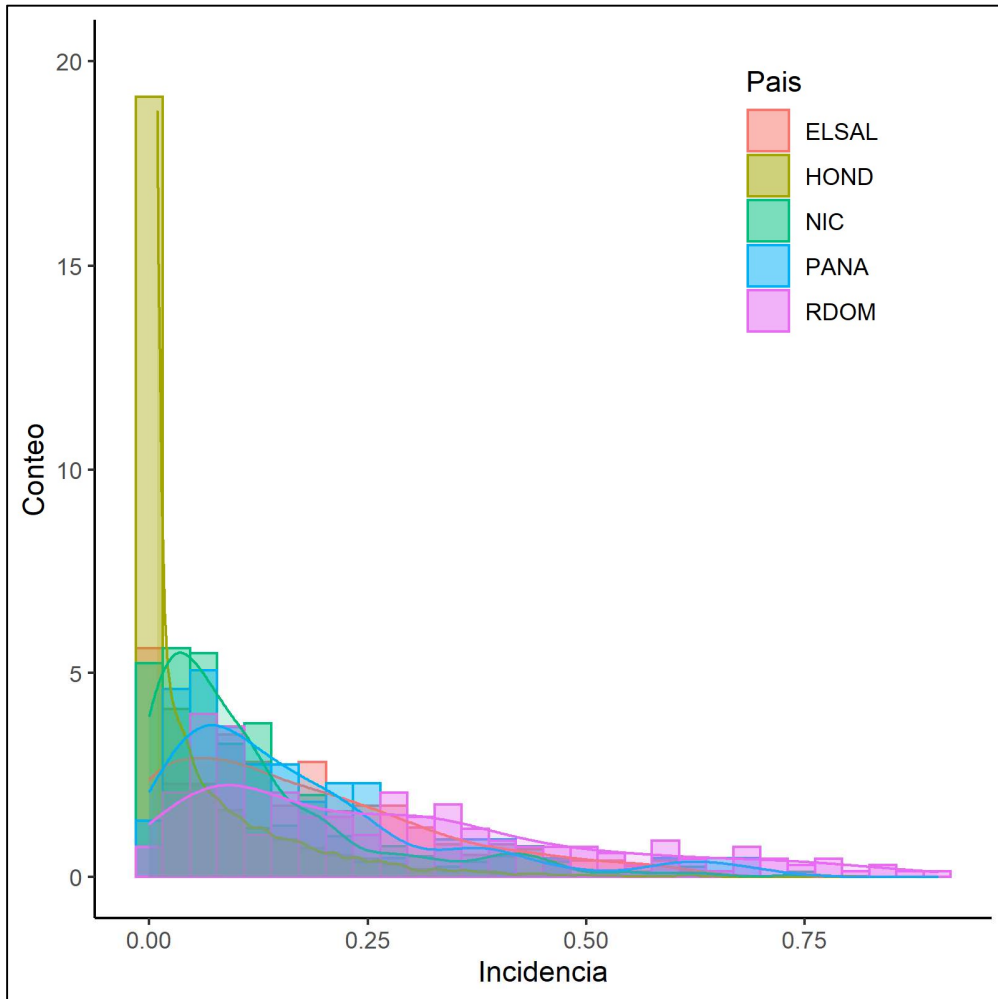


Figura 5. Histograma de frecuencia de los valores de incidencia máxima registrada en las parcelas de monitoreo y sus curvas de densidad.

El árbol de regresión explicó el 32% de los máximos de incidencia de roya en Centroamérica y República Dominicana. Las variables bioclimáticas más importantes fueron bio\_3 (Isotermalidad (rango diario de temperatura / rango anual de temperatura) × 100), bio\_4 (Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar × 100)), bio\_15 (Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación)), bio\_16 (precipitación del cuarto más húmedo), bio\_12 (Precipitación anual) y bio\_2 (rango diario medio (temperatura máxima - temperatura mínima)).

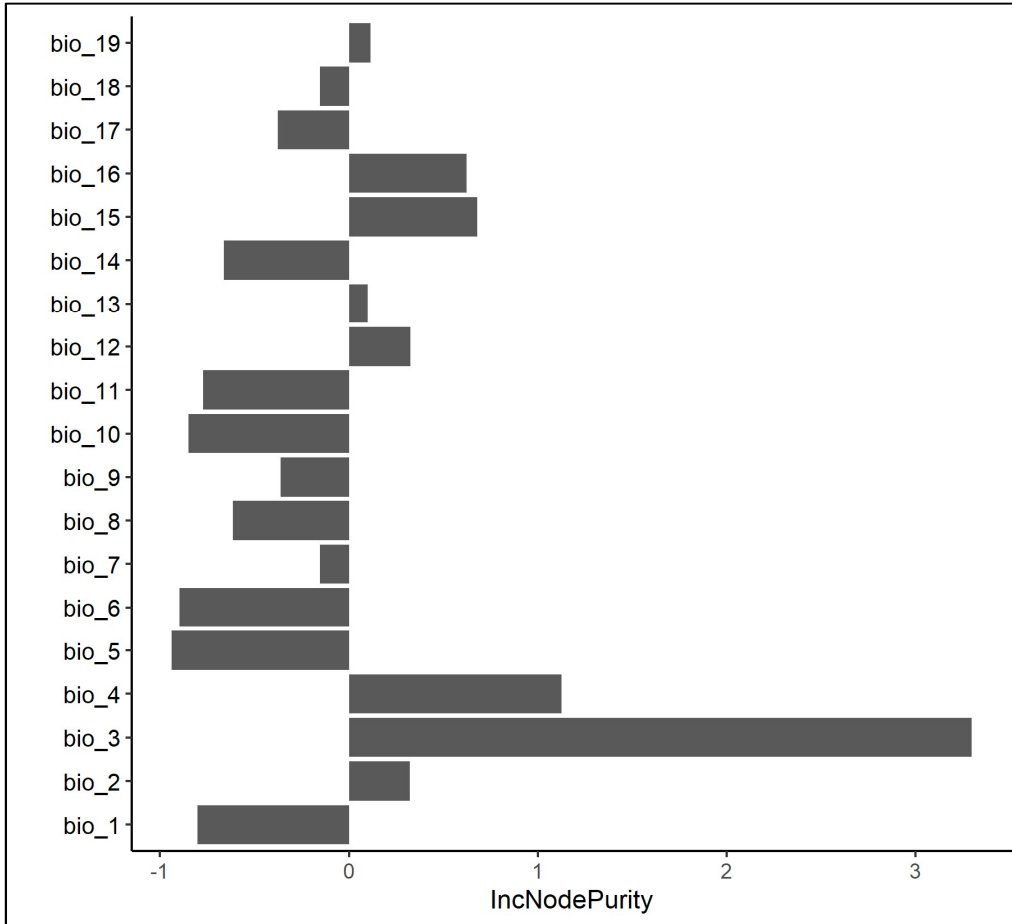


Figura 5. Variables bioclimáticas de importancia en el máximo de la incidencia de la roya. bio\_1 = temperatura media anual, bio\_2 = rango diurno medio (media mensual (temperatura máxima - temperatura mínima)), bio\_3 = Isotermalidad ( $\text{bio}_2 / \text{bio}_7$ ) ( $\times 100$ ), bio\_4 = Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar  $\times 100$ ), bio\_5 = Temperatura máxima del mes más cálido, bio\_6 = Temperatura mínima del mes más frío, bio\_7 = Rango anual de temperatura ( $\text{bio}_5 - \text{bio}_6$ ), bio\_8 = temperatura media del trimestre más húmedo, bio\_9 = Temperatura media del cuarto más seco, bio\_10 = temperatura media del trimestre más cálido, bio\_11 = Temperatura media del cuarto más frío, bio\_12 = Precipitación anual, bio\_13 = Precipitación del mes más húmedo, bio\_14 = Precipitación del mes más seco, bio\_15 = Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación), bio\_16 = Precipitación del cuarto más húmedo, bio\_17 = Precipitación del cuarto más seco, bio\_18 = Precipitación del trimestre más cálido, bio\_19 = Precipitación del cuarto más frío). Los valores del eje X corresponden al índice de impureza de los nodos estandarizados a un valor Z-normal. Por lo tanto, valores superiores a cero indican que son variables que tienen una importancia relativa superior a la media del índice.

### Relaciones parciales

La variable bio\_3 (Isotermalidad) mostró un efecto positivo con la incidencia de la roya. Las demás variables tienden a mostrar relaciones cuadráticas (bios 4, 15, 16, 12 y 2) teniendo una disminución mínima en valores menores a la media de la variable bioclimática y un posterior efecto positivo (Figura 6).

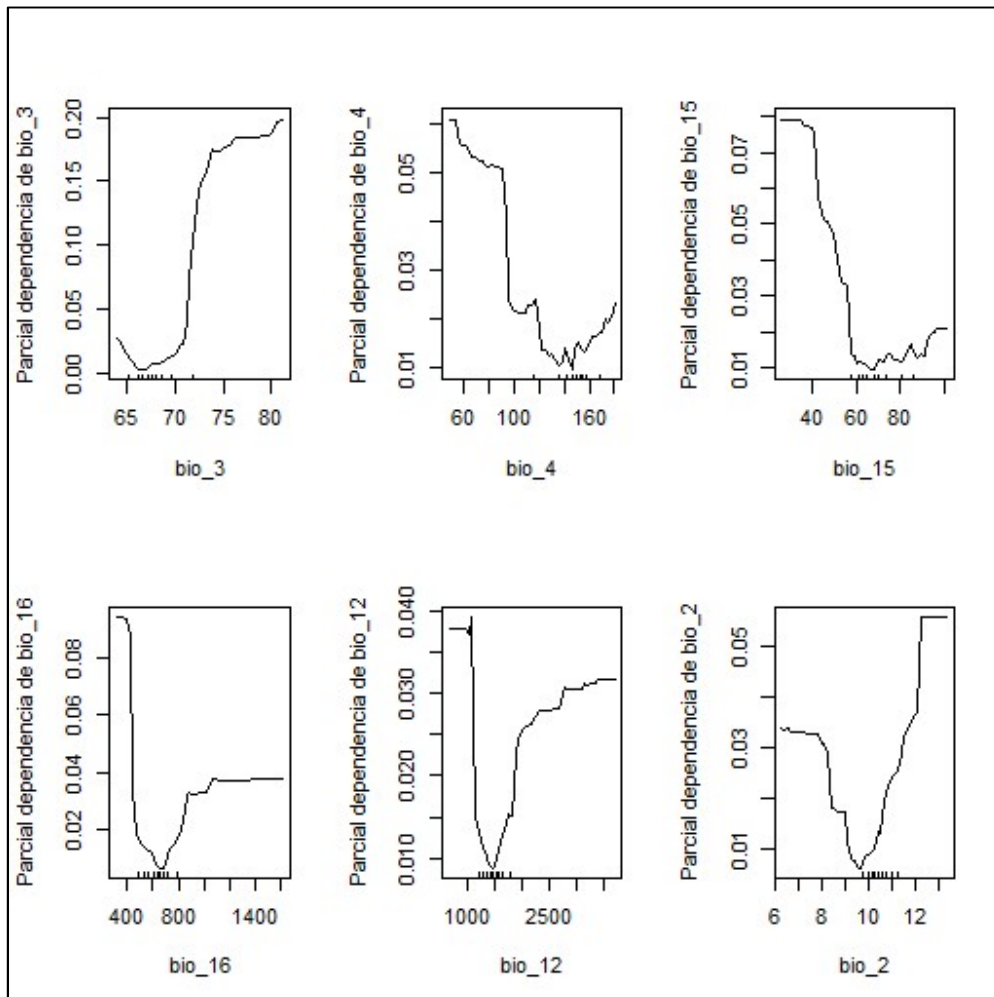


Figura 6. Relaciones parciales de las seis variables bioclimáticas más importantes. bio\_2 = rango diurno medio (media mensual (temperatura máxima - temperatura mínima)), bio\_3 = Isotermalidad ( $\text{bio}_2 / \text{bio}_7$ ) ( $\times 100$ ), bio\_4 = Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar  $\times 100$ ), bio\_12 = Precipitación anual, bio\_15 = Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación), bio\_16 = Precipitación del cuarto más húmedo.

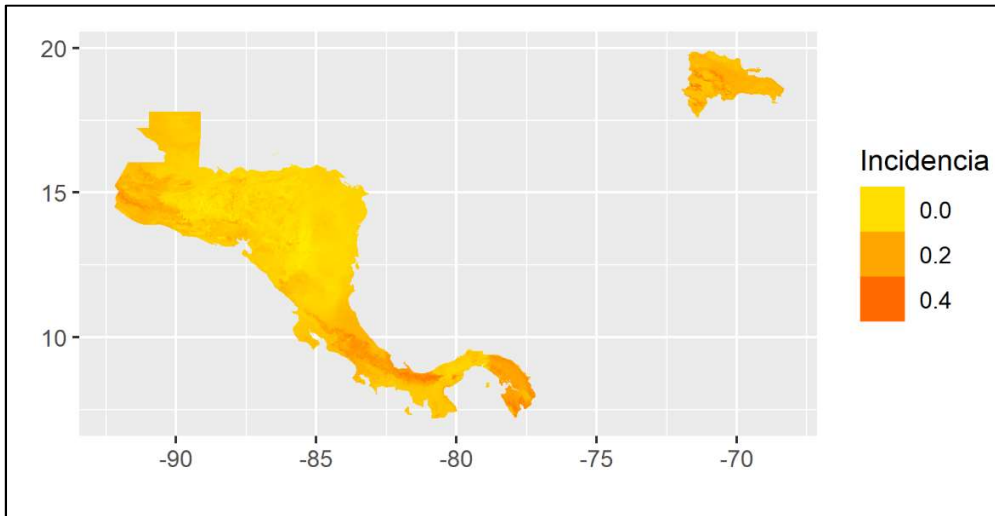
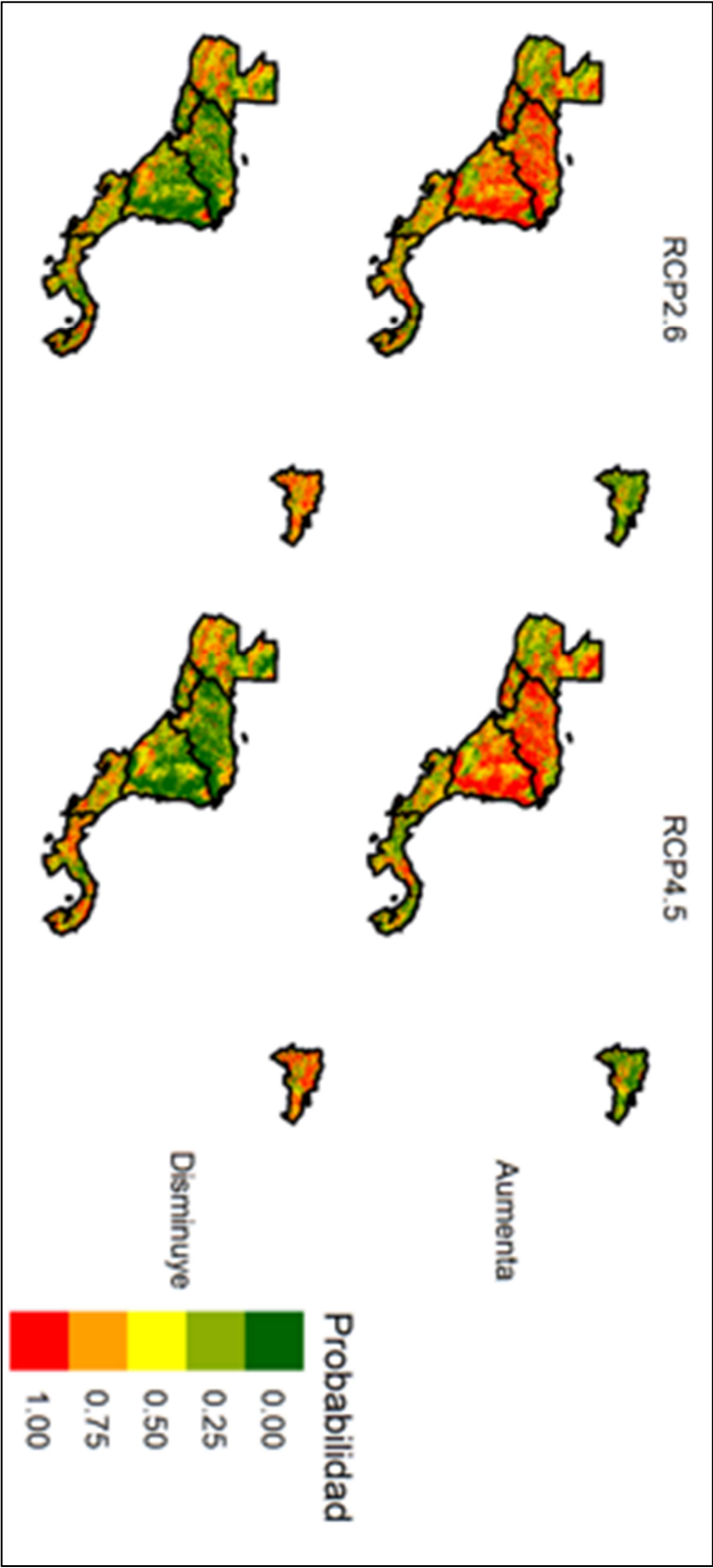


Figura 7. Distribución potencial actual de la incidencia máxima de la roya en Centroamérica y República Dominicana.

#### *Escenarios de cambio climático*

En general en casi toda Centroamérica se espera un aumento de los máximos de incidencia de roya para el periodo de tiempo 2041-2060. Sin embargo, para el caso de República dominicana se espera una disminución del máximo de la incidencia de la roya.

Figura 6. Distribución espacial de la roya del café bajo los dos escenarios RCP. Los valores de los mapas son probabilidades basadas en los nueve modelos de circulación global por escenario y la tendencia de cada modelo con respecto a la distribución del máximo de incidencia de la roya.



## *Mensajes*

La poca variación que explican los modelos puede deberse a los múltiples factores que no fueron considerados en los ajustes, como por ejemplo el manejo de las parcelas para el control de la roya.

Los modelos de variabilidad climática son un acercamiento al pronóstico de la incidencia de roya considerando únicamente variables climáticas. Estos modelos (árboles de regresión y clasificación) pueden ensamblarse (mezcla de las predicciones) para obtener un consenso en el pronóstico de la incidencia de la roya. Ambos modelos son consistentes en la variabilidad explicada o error de clasificación, mostrando una complementariedad en la confiabilidad de las predicciones.

Es importante destacar que para ambos modelos las variables de viento, temperatura y precipitación mostraron señal de importancia entre los 20 y 30 días antes de la observación de la incidencia, similar al tiempo de incubación de la roya del café.

Es necesario explorar el desempeño de los modelos de variabilidad climática como herramienta de pronóstico.

El modelo de la distribución de los máximos de incidencia de roya mostro bastante consistencia con los datos observados, las variables bioclimáticas que mayor peso ejercen en las predicciones fueron variables que miden la variabilidad del clima anual (estacionalidad).

Se observa que los modelos de circulación global tienen un consenso en el aumento en los máximos de incidencia de roya para la región de Centroamérica, contrario a República Dominicana que muestra una disminución, este patrón mostrado en Dominicana puede ser atribuido a un desgaste biótico (Colwell et al. 2018).

## *Limitaciones*

No se contó con información de todos los países de la región para obtener información confiable.

No fue posible realizar validaciones de campo de los pronósticos de los modelos (variabilidad y distribución del máximo de roya).

No es posible evaluar la dirección de cambio dado que no se modelaron la distribución de las áreas de potenciales de café bajo estos escenarios de cambio climático.

Es posible ajustar los modelos a árboles multivariados para modelar el máximo o promedio mensual de la incidencia de la roya, o ajustar curvas y modelar sus parámetros. Para este enfoque era



necesario tiempo y servidores de procesamiento de datos para la construcción y posterior corrida del algoritmo.

## *Bibliografía*

AVELINO, J., AND G. RIVAS. 2013. La roya anaranjada del cafeto <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01071036>, 47 p.

AVELINO, J.; CRISTANCHO, M.; GEORGIU, S.; IMBACH, P.; AGUILAR, L.; BORNEMANN, G.; LÄDERACH, P.; ANZUETO, F.; HRUSKA, A.J.; MORALES, C. 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008-2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Security*, v.7, p.303-321, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12571-015-0446-9>.

BACA, M., LADERACH, P., HAGGAR, J., SCHROTH, G., AND O. OVALLE. 2014. An Integrated Framework for Assessing Vulnerability to Climate Change and Developing Adaptation Strategies for Coffee Growing Families in Mesoamerica. *Plos one*. [doi.org/10.1371/journal.pone.0088463](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088463)

COLWELL, RK; BREHM, G; CARDELUS, CL; GILMAN, AC; LONGINO, JT. 2008. Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the wet tropics. *Science* 322 (258-61).

GAY, C., ESTRADA, F., CONDE, C., EAKIN, H., AND L. VILLERS. 2006. Potential Impacts of Climate Change on Agriculture: A Case of Study of Coffee Production in Veracruz, Mexico. *Climatic Change*. 79: 259-288.

GHINI, R., HAMADA, E., PEDRO JUNIOR, MJ., AND GONÇALVES, RV. 2010. Incubation period of *Hemileia vastatrix* in coffee plants in Brazil simulated under climate change. *Summa Phytopathologica*, 37: 2, 85:93.

Hijmans R. 2019. raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 3.0-7. <https://CRAN.R-project.org/package=raster>

IMBACH, P., FUNG, E., HANNAH, L., NAVARRO-RACINES, C., ROUBIK, E., RICKETTS, T., HARVEY, CA., DONATTI, C., LADERACH, P., LOCATELLI, B AND PE., ROEHRDANZ. 2017. Coupling of pollination services and coffee suitability under climate change. *PNAS*. [doi.org/10.1073/pnas.1617940114](https://doi.org/10.1073/pnas.1617940114)

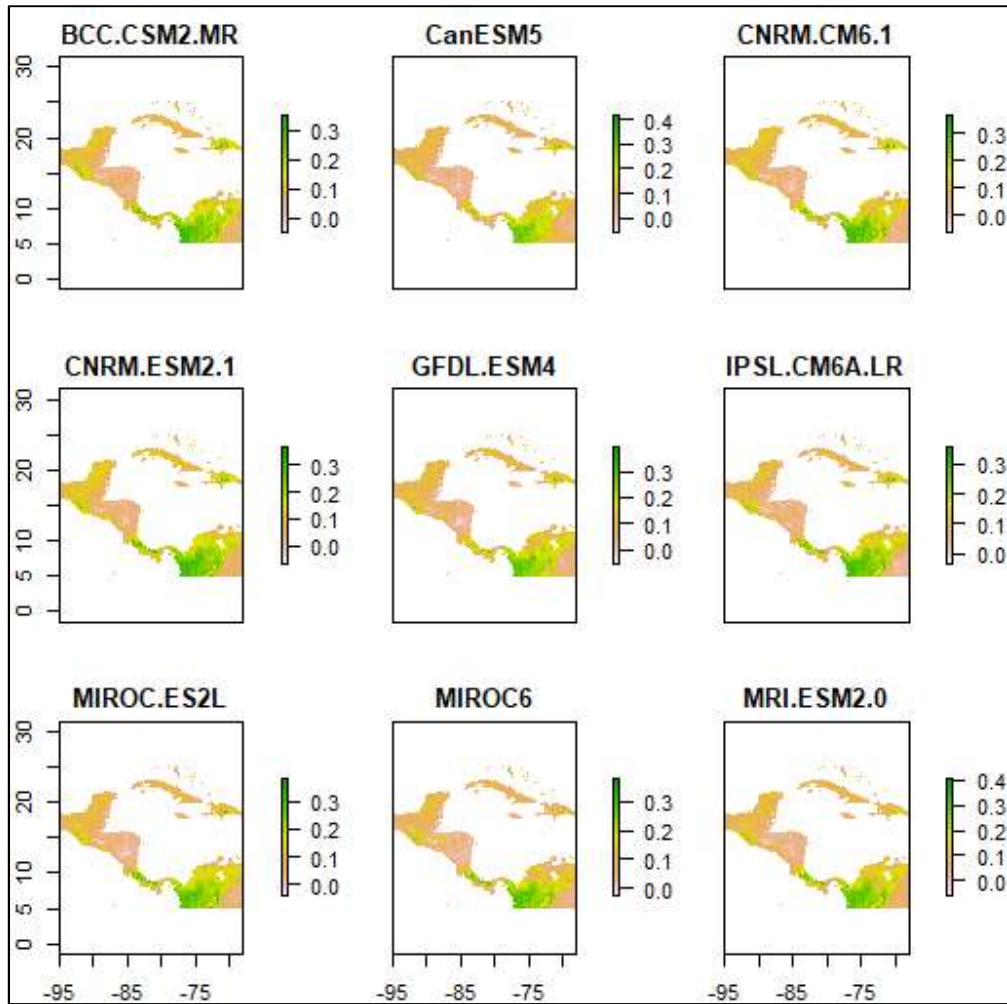
IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE) (2001) CLIMATE CHANGE 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II and III to the Third Assessment Report

- of the Intergovernmental Panel on Climate Change Impacts, Adaptation, and Vulnerability. In: Watson RT, Core Writing Team (eds). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p 398
- LADERACH, P., LUNDY, M., JARVIS, A., RAMIREZ, J., PEREZ PORTILLA, E., SCHEPP, K., AND A. EIZINGER. 2010. Predicted Impact of Climate Change on Coffee Supply Chains. The Economic, Social and Political Elements of Climate Change. 703-723
- LIAW, A. Y M. WIENER 2002. Classification and Regression by randomForest. R News 2 (3): 18--22.
- Dowle, M and A, Srinivasan. 2019. data.table: Extension of `data.frame`. R package version 1.12.6. <https://CRAN.R-project.org/package=data.table>
- OLATINWO R, BLOMQUIST S (2015) Influence of El Nino southern oscillation on historical outbreaks of the southern pine beetle, *Dendroctonus frontalis* Zimmermann, in the southern United States. In: Entomological Society of America 2015 Annual Meeting. Minneapolis, MN,
- R CORE TEAM (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- PHILLIPS. S.J., R.P. ANDERSON Y E. SCHAPIRE. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190: 231–259.
- RIVILLAS OSORIO, C.A.; SERNA GIRALDO, C.A.; CRISTANCHO ARDILA, M.A.; Y GAITAN BUSTAMANTE, A.L. 2011. La roya del cafeto en Colombia - Impacto, manejo y costos del control. Caldas, Co: Cenicafé. 51 p.
- SHIOMI, H.F.; SILVA, H.S.A.; DE MELO, I.S.; NUNES, F.V.; BETTIOL, W. 2006. Bioprospecting endophytic bacteria for biological control of coffee leaf rust *Scientia Agricola* 63(1): 32-39.
- WICKHAM, H. 2016. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York.
- WOOD, SN. 2017. Generalized Additive Models: An Introduction with R (2nd edition). Chapman and Hall/CRC.
- VILLAREINA-ACUÑA, R. 2014. Análisis de las condiciones de manejo que propiciaron el impacto de la roya (*Hemileia vastatrix*) en la zona cafetalera de los municipios de Jinotega, el Tuma-La Dalia y San Ramón, Nicaragua. Tesis MSc. CATIE 80 p.

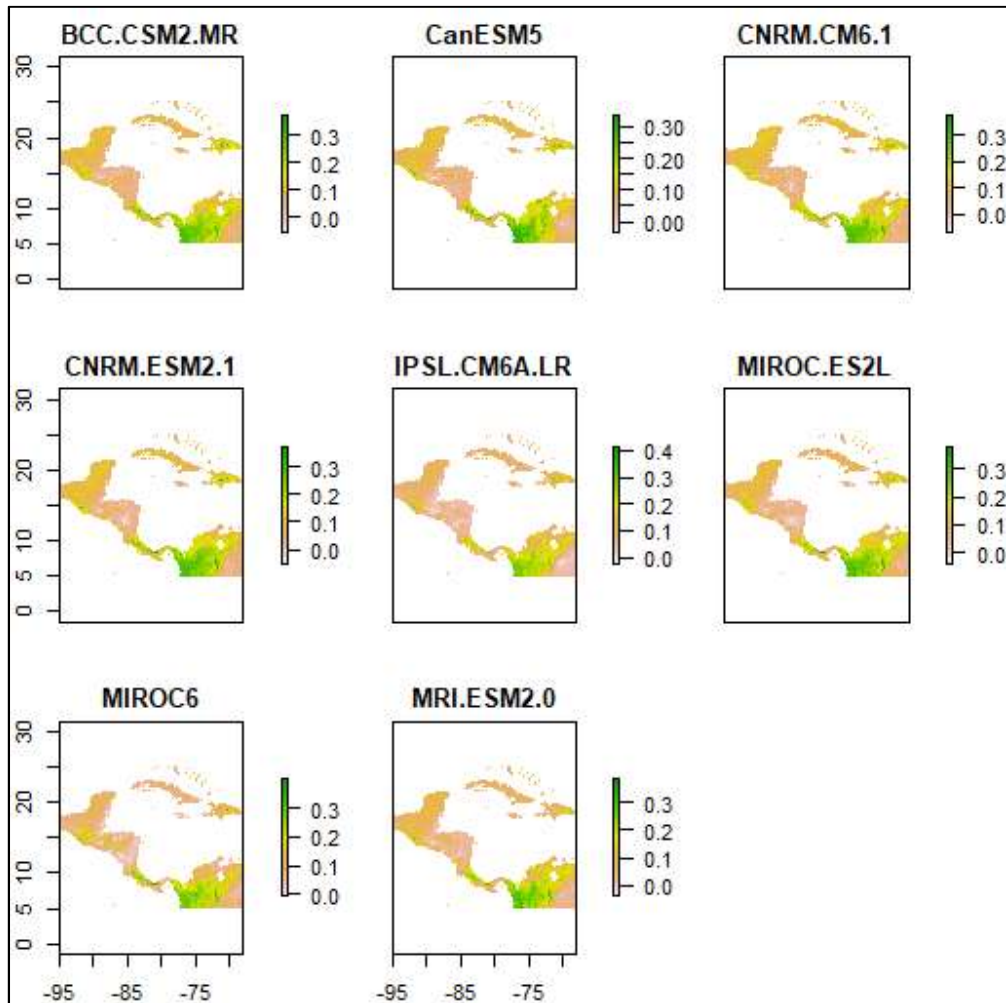
Yee, TW. 2019. VGAM: Vector Generalized Linear and Additive Models. R package version 1.1-1. URL <https://CRAN.R-project.org/package=VGAM>

## Apéndices

Apéndice 1. Distribución espacial de los máximos de incidencia de la roya bajo el escenario 2.6 basado en cada uno de los modelos de circulación global.

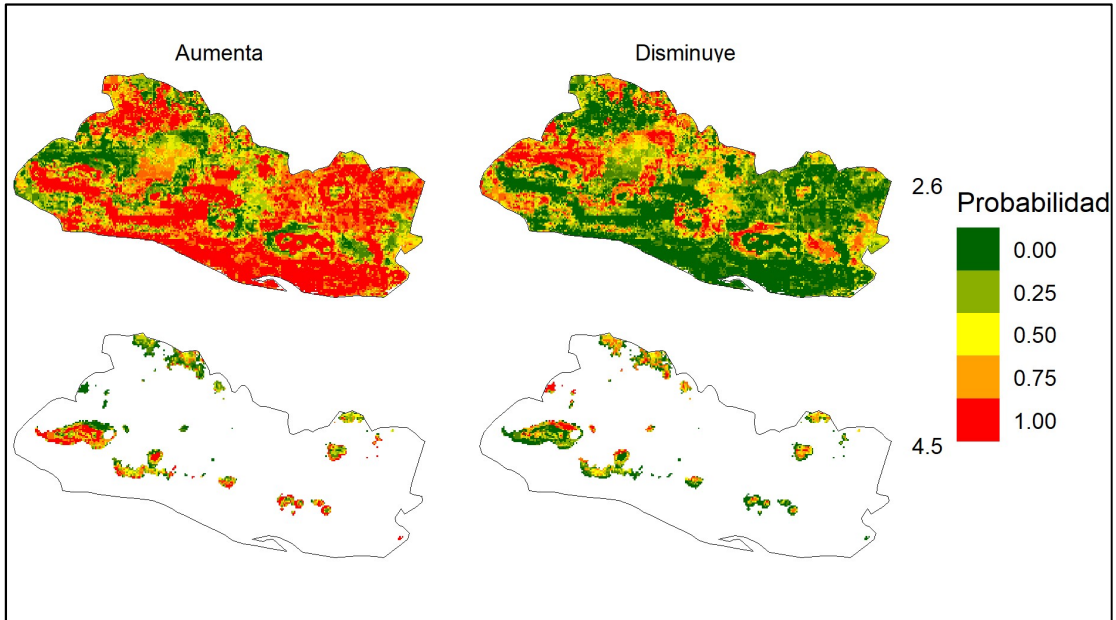


Apéndice 2. Distribución espacial de los máximos de incidencia de la roya bajo el escenario 4.5 basado en cada uno de los modelos de circulación global.

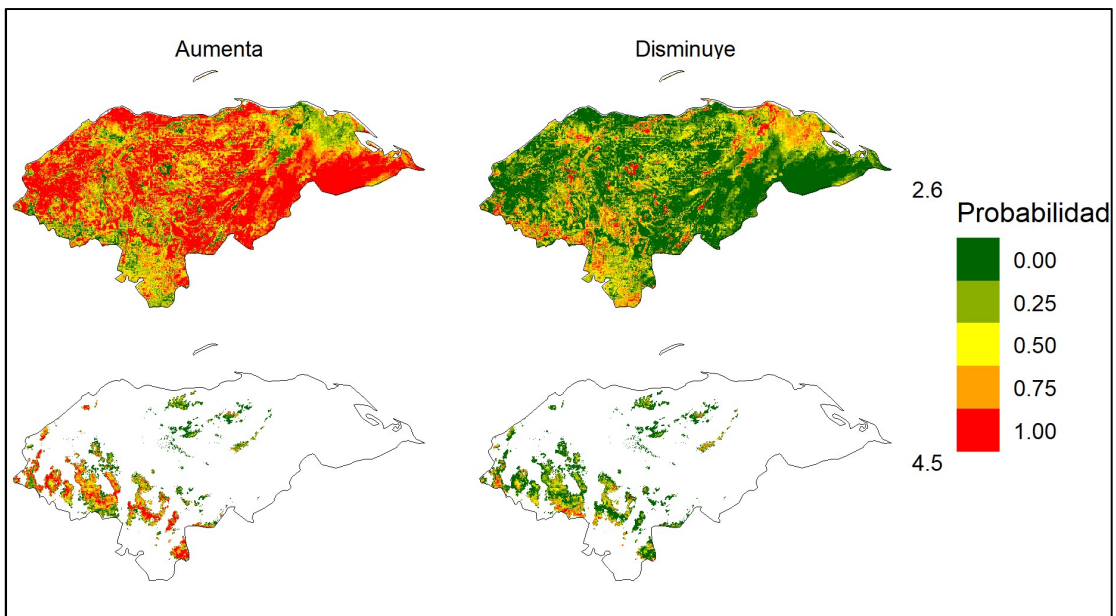


Apéndice 3. Probabilidad de cambio basado en los escenarios climáticos por País.

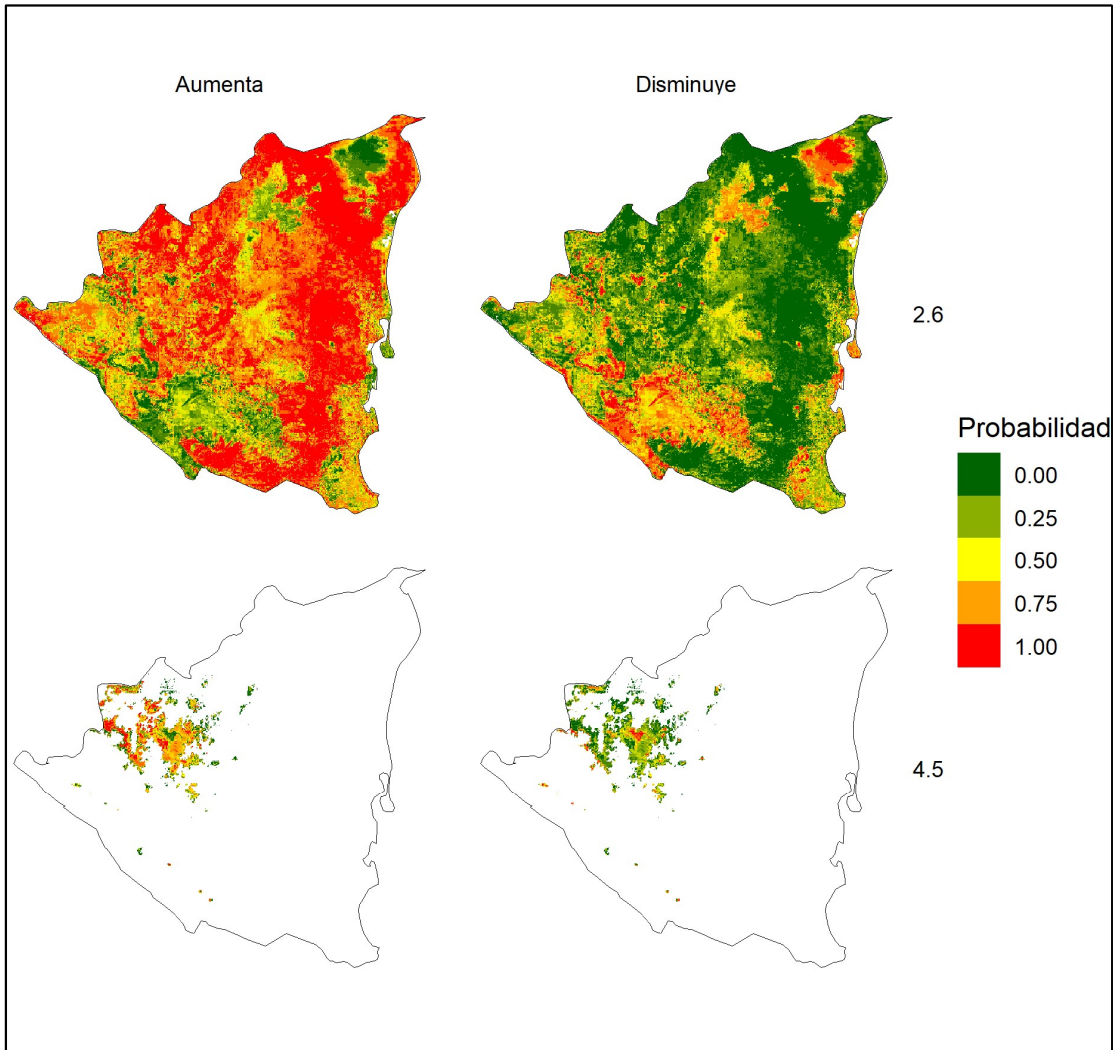
El Salvador



Honduras

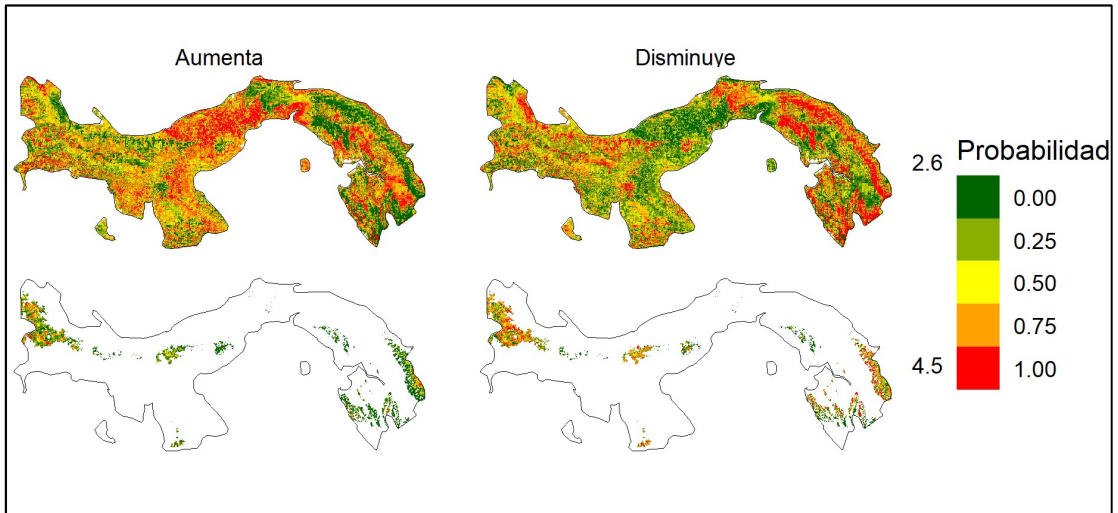


Nicaragua

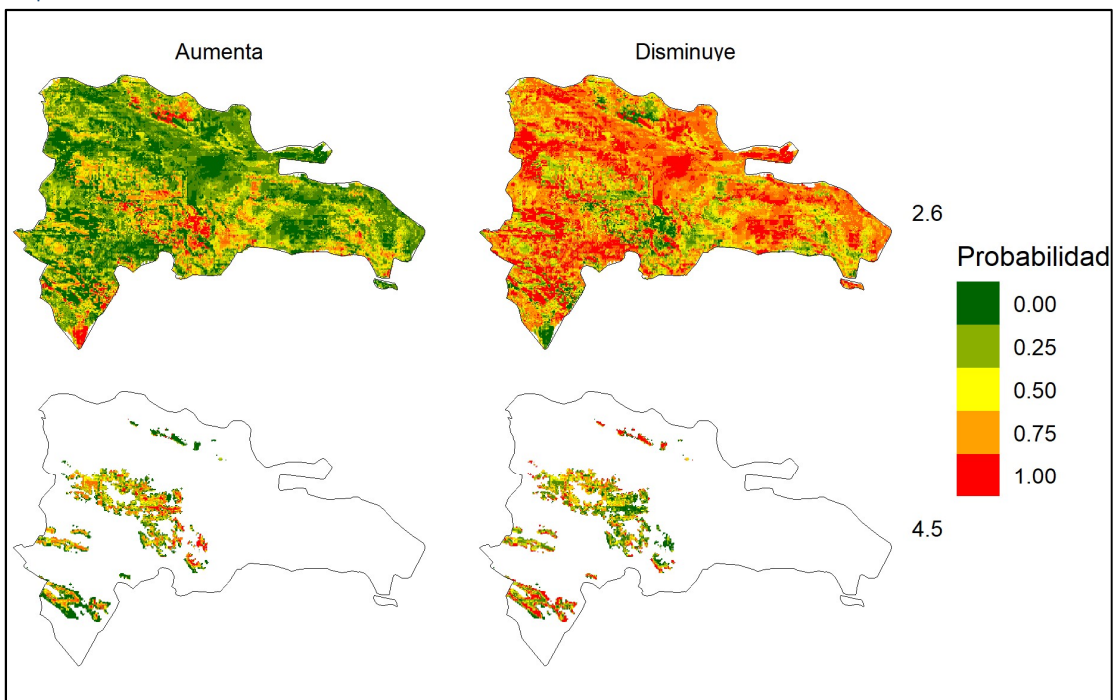




Panamá

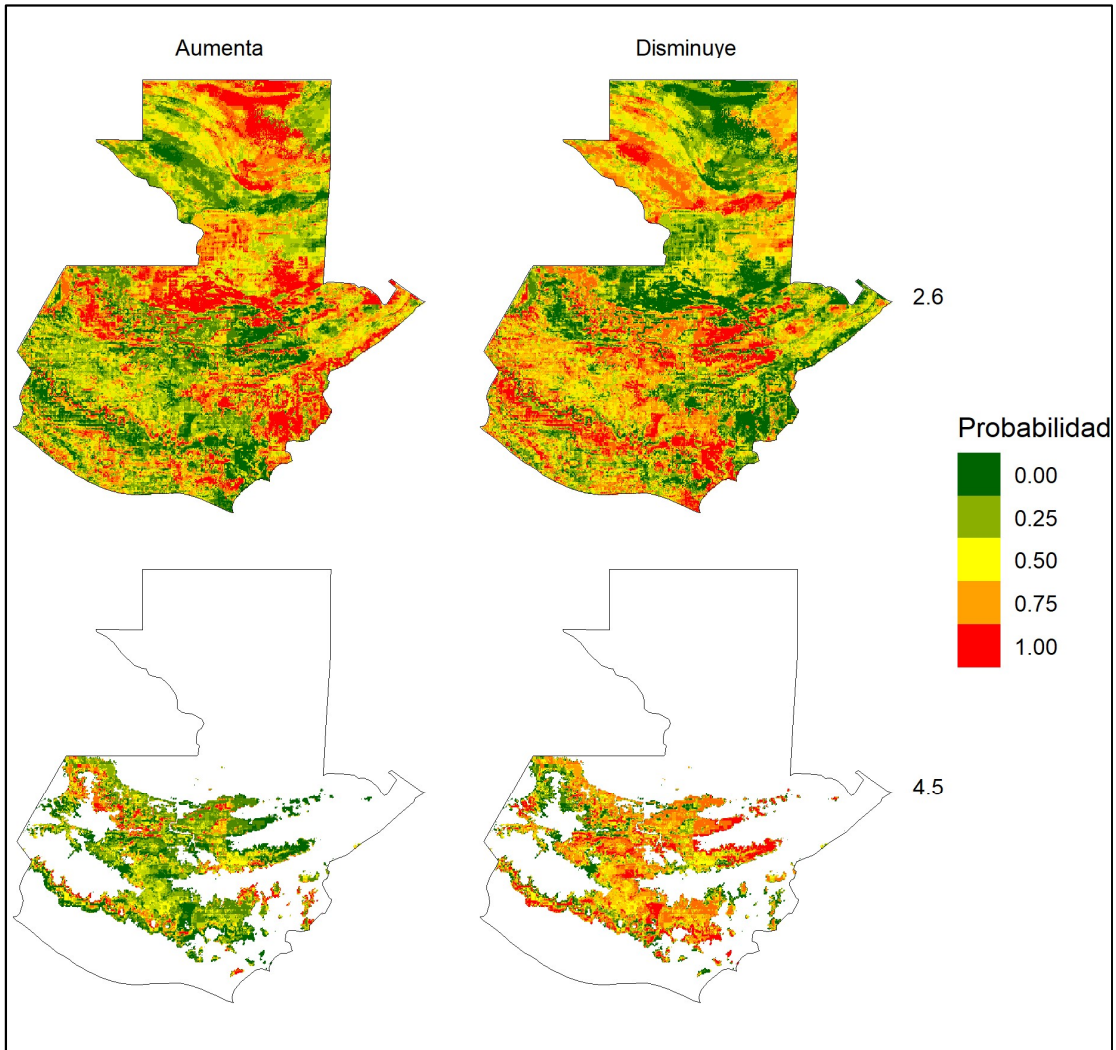


República Dominicana





Guatemala



Costa Rica

