

Distribución espacial del cuero de sapo en yuca, en el Caribe colombiano

Spatial Distribution of Frog Skin on Cassava in the Colombian Caribbean

 Lilibet Tordecilla-Zumaqué¹,  Rodrigo Orlando Campo-Arana^{2,*} y  Oscar Alberto Burbano-Figueroa³

Resumen

El cuero de sapo de la yuca (CS) ha sido considerado una enfermedad emergente en las Américas, principalmente en Colombia entre 2019–2020. Su etiología se atribuye a una infección mixta de virus y fitoplasmas, que afecta el llenado de las raíces hasta un 100 %. En Colombia, la región Caribe es la principal zona productora de yuca, especialmente los departamentos de Córdoba, Sucre y Bolívar; por lo tanto, este trabajo se estableció para determinar la distribución espacial del CS en estos departamentos y estimar su posible ocurrencia en otras zonas productoras de la región. La estimación se realizó a partir de datos de presencia o ausencia de la enfermedad en 740 plantas de yuca. Los registros positivos con sus coordenadas se utilizaron en el modelo MaxEnt mediante el análisis de variables climáticas. La enfermedad se detectó en el 64 % de las plantas muestreadas. El modelo mostró una alta validación estadística (test AUC $\geq 0,9$), lo cual permite predecir los lugares de mayor riesgo para la dispersión del CS. Las zonas más vulnerables fueron aquellas con temperatura máxima del período más caliente (BIO 5 ~ 30,4 °C) y mínima del más frío (BIO 6 ~ 23,4 °C); se ubican al centro y norte de Sucre (P = 0,46–0,75), zonas de sabana y bajo Sinú en Córdoba (P = 0,26–0,45), centro y sur del Cesar (P = 0,46–0,75) y baja Guajira (P = 0,26–0,45).

Palabras clave: modelo de simulación, epidemiología, MaxEnt, predicción.

Abstract

Cassava Frog Skin (CS) has been considered an emerging disease in the Americas, mainly in Colombia between 2019 and 2020. Its etiology is attributed to a mixed virus and phytoplasma infection, affecting root filling by up to 100%. In Colombia, the Caribbean region is the main cassava-producing area, especially the departments of Córdoba, Sucre, and Bolívar; therefore, this work was initiated to determine the spatial distribution of CS in these departments and estimate its possible occurrence in other producing areas of the region. The estimation was made from data on the presence or absence of the disease in 740 cassava plants. Positive records with their coordinates were used in the MaxEnt model through the analysis of climatic variables. The disease was detected in 64% of the sampled plants. The model showed high statistical validation (AUC test ≥ 0.9), which allows predicting the areas of greatest risk for the spread of CS. The most vulnerable areas were those with maximum temperature of the hottest period (BIO 5 ~ 30.4 °C) and minimum temperature of the coldest period (BIO 6 ~ 23.4 °C); they are located in the center and north of Sucre (P = 0.46–0.75), savanna zones and Lower Sinú in Córdoba (P = 0.26–0.45), center and south of Cesar (P = 0.46–0.75), and Lower Guajira (P = 0.26–0.45).

Keywords: simulation model, epidemiology, MaxEnt, prediction.

Recibido: 13/05/2025

Aceptado: 04/08/2026

Publicado: 14/08/2026

Sección: Artículo Original

***Autor correspondiente:** rodrigocampo43@hotmail.com

Introducción

En los últimos 20 años, la producción de yuca ha experimentado un crecimiento constante, con un incremento anual superior al 3% a nivel mundial, gracias a su potencial de contribuir en la reducción los índices de pobreza alimentaria y energética de la zona rural; además, ofrece importantes beneficios macroeconómicos al competir con otros sistemas productivos; (Cock & Connor, 2020; Organization For Economic Cooperation and Development & Food And Agriculture Organization, 2023). En Colombia, la raíz de la yuca es un alimento fundamental en la gastronomía nacional; además, es una materia prima esencial para la producción de productos agroindustriales, como almidón y etanol (AGROSAVIA, 2022). A nivel nacional para el año 2022, el 93% del área cultivada fue destinada al consumo humano, lo que equivale a 201.114 hectáreas; mientras que, el 7% restante correspondió a yuca industrial, con 13 000

hectáreas (AGRONET, 2024; ‘Aportes y perspectivas del mejoramiento genético de yuca’, s.d.). La región del Caribe es uno de los principales núcleos de producción de yuca en Colombia, siendo los departamentos de Bolívar, Magdalena, Sucre y Córdoba, los mayores productores; donde Córdoba y Sucre aportan cerca del 100% de la yuca industrial a nivel nacional y el 20% de la yuca dulce (Rosero et al., 2023)

¹Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Córdoba, Colombia,

²Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Córdoba, Colombia. Grupo de investigación Agricultura Sostenible.

³Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. Agrosavia.

Como citar: Tordecilla Zumaque, L., Campo Arana, R. O., & Burbano-Figueroa, O. A. (2026). Distribución espacial del cuero de sapo en yuca, en el Caribe colombiano. *Revista de Investigaciones Altoandinas–Journal of High Andean Research*, 28, e28721. <https://doi.org/10.18271/ria.2026.721>



Attribution 4.0 Internacional (CC BY 4.0) Share–Adapt

El sistema de producción de yuca en Colombia es minifundista (85%), con cultivos en superficies menores a 10 hectáreas, utilizando prácticas tradicionales y con poca modernización (MADR, 2017). Según el uso preferido (consumo o industrial), se emplean diferentes variedades de yuca, destacándose la variedad venezolana por su alto contenido de materia seca y almidón, destinada al mercado en fresco y a la alimentación animal, y las variedades TAI8 y Verónica, con buen potencial para la producción industrial (Aguilera, 2012). Las variedades de yuca preferidas en el Caribe colombiano incluyen tanto variedades criollas y mejoradas; no obstante el rendimiento potencial depende del material de siembra y del manejo del cultivo (Taborda et al., 2022).

La calidad fitosanitaria de la yuca se ve afectada por diversas enfermedades, siendo el Cuero de Sapo (CS) una de las más limitantes para la producción mundial, causando pérdidas superiores al 50% (Betancourth et al., 2019a; Pardo et al., 2022a). El cuero de sapo está ampliamente distribuido en América Central y del Sur (Freitas et al., 2020; Koinuma et al., 2018). En Colombia se ha reportado en los departamentos de Sucre, Córdoba, Valle del Cauca, Meta, Boyacá y Quindío, ocasionando pérdidas hasta el 100% (Álvarez et al., 2014a). Entre las estrategias de manejo, se destaca el monitoreo y diagnóstico oportuno (Rosero Alpalá et al., 2023).

Los síntomas del CS se caracterizan por la presencia de raíces delgadas, fibrosas y leñosas que no alcanzan el desarrollo de una planta sana, siendo detectables solo al momento de la cosecha (Caicedo et al., 2023; Calvert et al., 2012). La principal fuente de diseminación es el uso de semilla vegetativa infectada (Gómez et al., 2015; Pardo et al., 2022; Suárez & Mederos, 2011), recomendándose el uso de semillas libres de la enfermedad en nuevas siembras (Álvarez et al., 2014a; Pardo et al., 2022a). La etiología del CS ha sido contradictoria, donde se ha reportado la presencia de fitoplasmas (Álvarez et al., 2014; Betancourth et al., 2019b), así como de un complejo viral de las familias Secoviridae, Alphaflexiviridae y Luteoviridae (Carvajal et al., 2014). Sin embargo, ninguna de estas investigaciones ha sido corroborada mediante pruebas de patogenidad, aunque estudios recientes sugieren la presencia de infecciones mixtas de virus y fitoplasmas como la causa del CS (Pardo et al., 2022). Pese a estos hallazgos importantes, investigaciones recientes indican infecciones únicas por torradovirus (Jimenez et al., 2024) por tanto, independiente a los diagnósticos realizado todo apunta a la selección de material de siembra sano para minimizar los riesgos de la enfermedad.

La falta de información precisa sobre la distribución geográfica del CS en el Caribe colombiano requiere la adopción de medidas técnicas y legales para prevenir su diseminación en las zonas productoras de yuca en

la región que aún están libres de la enfermedad. Entre las herramientas utilizadas para identificar los nichos ecológicos de diferentes patosistemas se encuentra el modelo MaxEnt, que permite estudiar y predecir la distribución espacial de especies (Kogo et al., 2019; Munar et al., 2021; Phillips et al., 2006). Este modelo utiliza puntos de presencia conocidos y variables explicativas para proporcionar una estimación de la presencia en un área de estudio (Fithian et al., 2014). El uso de modelos de distribución de especies como MaxEnt ha sido aceptado para predecir el nicho ecológico de una plaga en un país o continente, basándose en variables ambientales donde la especie está presente (Byeon et al., 2018). El modelado de la distribución potencial de especies con MaxEnt permite determinar la diversidad de las especies y los puntos críticos importantes para su conservación, como el hábitat y factores ambientales (Wang et al., 2024). El objetivo de esta investigación consistió en determinar la distribución espacial del CS en los departamentos de Córdoba y Sucre, y estimar la predicción de ocurrencia en otras zonas productoras de yuca de la región caribe colombiana.

Materiales y Métodos

Localización

La Investigación de campo se desarrolló en fincas productoras de yuca para consumo fresco e industrial pertenecientes a los departamentos de Córdoba (8.7510° N, 75.8785° W) y Sucre (8.8140° N, 74.7233° W), ambos localizados al norte del país en la llanura del Caribe Colombiano, presentan condiciones climáticas similares, donde la mayor parte del territorio corresponde a piso térmico cálido. De acuerdo con el Instituto de Hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM, 2025), en el departamento de Córdoba la temperatura promedio es de 28,8°C, humedad relativa entre el 81,8 y 92,3 %, y precipitaciones anuales de 1.262 mm. El departamento de Sucre presenta temperatura media 28,4°C, humedad relativa entre 56% y 74% y precipitación anual 970 mm.

Selección de los sitios de muestreos

El muestreo se realizó en las principales áreas productoras de yuca, de los departamentos de Córdoba y Sucre, las cuales fueron definidas por su tradición en el manejo del cultivo, registros de producción obtenidos de los informes de la Secretaría de Agricultura de cada departamento, e informes del laboratorio de diagnóstico de sanidad vegetal del ICA. Fueron muestreados 13 municipios en Sucre, los cuales se distribuyeron 7 en subregiones de sabanas, tres en el golfo de Morrosquillo, dos en Montes de María y tres en la subregión del San Jorge. En el departamento de Córdoba se seleccionaron 10 municipios, tres en el bajo Sinú, dos en la zona costanera, cuatro en subregión de sabanas, uno en el medio Sinú.

Severidad y prevalencia del Cuero de sapo

En campo se muestrearon 740 plantas de yuca, distribuidos en 74 fincas; 45 en Sucre y 29 en Córdoba; las cuales fueron georreferenciadas, y entre cada finca se conservó una distancia superior a los 5 km. La evaluación de CS se realizó en la etapa de cosecha, seleccionando en cada finca 10 plantas al azar, en las cuales valoró la presencia o ausencia de los síntomas de la enfermedad. Los datos fueron obtenidos en el año 2011 y validados en el 2018.

De acuerdo con los síntomas observados se determinó la incidencia de CS por finca (INC), estimada en porcentaje y se determinó mediante la relación entre el número de plantas enfermas sobre el total de plantas evaluadas, multiplicado por cien. La severidad fue estimada usando la escala propuesta por (Álvarez et al., 2014b) y modificada en esta investigación, donde combina el tipo de síntomas con el porcentaje de raíces afectadas (Tabla 1).

Tabla 1

Escala para medir la severidad del Cuero de sapo en raíces de yuca

Grado	Intensidad de labios o fisuras en las raíces
0	No presenta síntomas visibles
1	Hasta 10 labios presentes en cualquier parte de la raíz, afectando hasta el 10 % de las raíces
2	Hasta 10 labios presentes, afectando entre 11 y 25 % de las raíces
3	Hasta 10 labios presentes, afectando, entre el 26–50 % de las raíces
4	Hasta 10 labios presentes, afectando más del 50 % de las raíces.
5	Más de 10 labios presentes, afectando hasta en el 25 % de las raíces
6	Más de 10 labios en cualquier parte de la raíz en más del 25 % de las raíces
7	Red o panal presente, hasta en el 25 % de las raíces
8	Red o panal entre 26 y 50 % de las raíces
9	Red o panal en más del 50 % de las raíces, hasta con un 25% de raíces están leñosas
10	Red o panal en más del 50 % de las raíces con más del 25 % de raíces leñosas.

Fuente: Escala de severidad propuesta por (Álvarez et al., 2014b); modificada por los autores para ajustar la severidad con el porcentaje de raíces afectadas por planta.

Los datos de severidad se usaron para calcular el índice de infección por medio de la metodología propuesta por McKinney (1923), a través de la siguiente fórmula:

$$I.I. = \frac{\sum (N^{\circ} \text{ de Plantas enfermas} \times \text{cada Gr de la escala})}{(N) \times (\text{Gr mayor de la escala})} \times 100 \quad (1)$$

Donde; I.I. representa el índice de infección, N es el número total de plantas evaluadas por localidad y Gr, el grado mayor de la escala

La prevalencia fue definida como el porcentaje de fincas que presentaron la enfermedad en cada municipio (Moreno et al., 2000). Con los datos de índice de enfermedad y prevalencia se determinó la distribución de la enfermedad en los departamentos de Córdoba y Sucre.

Se calcularon coeficientes de correlación entre la incidencia y severidad de la enfermedad por medio de la metodología de Pearson, usando el paquete estadístico SAS, versión 9.1 de acuerdo con la metodología propuesta por (Osorio Almanza et al., 2017)

Las fincas donde hubo presencia de CS, fueron empleadas para elaborar el modelamiento de predicción del riesgo potencial de la enfermedad, en los departamentos de Córdoba y Sucre a través del modelamiento de distribución de especies MDE. Para estimar la eficiencia del modelo en función de la presencia de la enfermedad se calculó el Área bajo la Curva- AUC el cual es un estadístico de ajuste y es

proporcionada por el programa Maxent como una salida gráfica. Los rangos de precisión del modelo en relación con los valores de AUC varían de 0 a 1, donde 0.5-0.6 se considera malo; 0.6-0.7, Pobre, de 0.7-0.80 satisfactorio, de 0.8-0.9 bueno y de 0.9-1.0 excelente. (Osorio Almanza et al., 2017; Swets, 1988)

Variables climáticas

El modelamiento de nichos para el desarrollo de CS, se estimó a partir del análisis de las variables ambientales que inciden en la zona de desarrollo de la enfermedad, obtenidas del modelo de Maxent (Osorio Almanza et al., 2017), las cuales fueron seleccionadas y obtenidas a partir de la base de datos contenida en WorldClim las cuales se emplean para uso cartográfico y creación de modelos espaciales, definida como un conjunto de capas climáticas globales durante 30 años (1970-2000) con una resolución espacial de aproximadamente 1 km² (Fick & Hijmans, 2017).

Los datos son a escala mundial, para 19 variables donde la temperatura es expresada en °C*10 (aumentada en 10°C) y la precipitación en milímetro (Fick & Hijmans, 2017). De las 19 variables de temperatura y precipitación que suministra el programa World Clim, para este estudio solo se tuvieron en cuenta aquellas con mayor incidencia en el caribe colombiano y se buscaron correlación entre ellas, la selección se basó en estudios realizados por diversos autores quienes manifiestan que uno de los factores más importante para la distribución

espacial de las enfermedades epidémicas como CS, es la temperatura. (Álvarez et al., 2014b; Calvert et al., 2012; Murrall et al., 1996; Osorio Almanza et al., 2017; Velásquez-Valle et al., 2014, 2017)

Las variables consideradas para el presente estudio correspondieron a: Temperatura máxima del período más caliente (BIO5); Temperatura mínima del período más frío (BIO6); Rango medio diurno (temp max–temp min; promedio mensual) (BIO2); Rango anual de temperatura (BIO5-BIO6) (BIO 7); Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación) (BIO15). Las variables bioclimáticas se derivan de los valores mensuales de temperatura y precipitación para generar más variables biológicamente significativas.

Modelamiento de Distribución de especies

La investigación empleó el algoritmo de Máxima Entropía para el modelamiento de distribución de especie (MAXENT) Versión 3.3.3.K. (Phillips et al., 2006); este modelo permite simular la distribución potencial de una especie en diferentes regiones geográficas, bajo diferentes escenarios climáticos (Xiao et al., 2024). En esta investigación el modelo fue construido siguiendo la metodología propuesta por (Osorio et al., 2017) considerando los datos de entradas las coordenadas geográficas de las fincas con presencia de la enfermedad y así obtener la distribución de CS en los departamentos de Córdoba y Sucre basado en el análisis de las variables climáticas anteriormente mencionadas. Consecutivamente se realizó el modelamiento de predicción de ocurrencia del CS en la región caribe. Para ello se incluyó la capa de distribución previamente

obtenida, las variables ambientales y los puntos geográficos con mayor probabilidad de riesgo. A partir de esta información se modeló la distribución potencial de la enfermedad, generando mapas de zonas de riesgo de ocurrencia de la enfermedad empleando el programa ArcMap versión 9.3.

Resultados

Las raíces afectadas con CS presentaban grietas longitudinales en forma de labio a lo largo de la raíz, siendo este el síntoma más sobresaliente en campo y visiblemente asociado a la enfermedad Cuero de Sapo. La intensidad de este síntoma varió desde muy suave a severo, dependiendo del grado de infección de la enfermedad. De las 74 fincas evaluadas, la prevalencia del CS fue del 64%, observándose diferentes grados de severidad en los síntomas.

En la figura 1 permite visualizar la distribución espacial del CS en los departamentos de Córdoba y Sucre, evidenciando la presencia y ausencia de esta enfermedad en la zona de estudio.

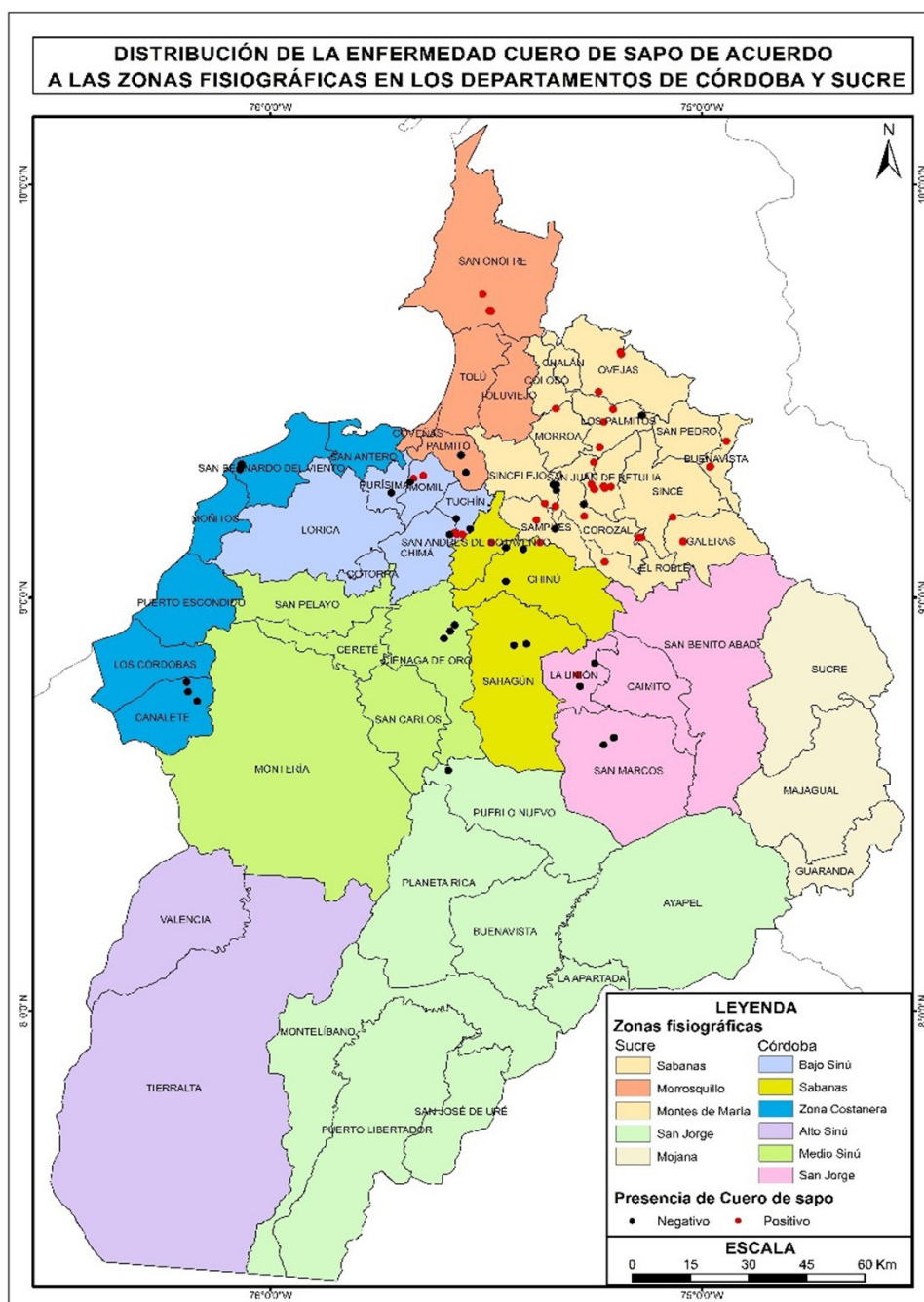
Los análisis de la prevalencia resaltan que en Sucre esta variable alcanzó un 86,6% mientras que, en Córdoba fue del 30 %. En las diferentes subregiones geográficas de Sucre, la prevalencia en las zonas de sabana osciló entre 66% y 100%, en la zona del Golfo de Morrosquillo fue del 100%, en la región del San Jorge fluctuó entre 0% y 66%, y en Montes de María entre 25% y 100%. En cuanto al índice de infección, los mayores valores de intensidad se detectaron en los municipios de Betulia, y Sampedra (tabla 2).

Tabla 2

Prevalencia e Índices de infección del CS en zonas productoras de yuca del departamento de Sucre

Zona Fisiográfica	Municipio	No. Lotes Muestreados	Resultado De Diagnostico		Prevalencia (%)	Índice De Infección
			Visual (+)	De Cs (-)		
Subregión Sabana	Sampedra	4	3	1	75	54
	Corozal	3	3	0	100	13
	Galeras	3	3	0	100	24
	Betulia	5	5	0	100	71
	Buenavista	3	2	1	66,6	27
	Los Palmitos	5	5	0	100	31
	El Roble	3	3	0	100	36
Subregión Golfo De Morrosquillo	San Onofre	3	3	0	100	25
	Tolú Viejo	1	1	0	100	47
	San Antonio De Palmito	3	3	0	100	39
Subregión San Jorge	Caimito	1	0	1	0	0
	San Marcos	3	2	1	66,6	6
	La Unión	2	0	2	0	0
Subregión Montes De María	Ovejas	2	2	0	100	24
	Sincelejo	4	1	3	25	6
Total	15	45	37	9	-	-

Nota. Elaboración propia a partir de datos registrados en campo

Figura 1*Distribución espacial de cuero de sapo en los departamentos de Córdoba y Sucre*

Nota. Puntos rojos = presencia de la enfermedad, Puntos negros = ausencia de la enfermedad. Fuente: Elaboración propia a partir de datos registrados en campo

En el departamento de Córdoba la prevalencia fue del 30 %; mientras que la prevalencia en las subregiones geográficas osciló entre el 0 -100% siendo los municipios de Chimá, Momil, y San Andres de sotavento los de mayor valor; además, San Andres de Sotavento registró el mayor índice de infección (Tabla 3).

El cuero de sapo estuvo presente en el 59,47 % de las fincas evaluadas, los síntomas se presentaron

con diversidad en el grado de daño, observándose la máxima severidad grado 10 en el 12 % de las fincas. Los resultados mostraron correlaciones significativas entre la incidencia y severidad de la enfermedad ($P \leq 0,001$) determinando que la sintomatología evaluada está asociada a los daños que manifiesta el Cuero de Sapo en las raíces de yuca y la incidencia.

Tabla 3*Prevalencia e Índices de infección del CS en zonas productoras de yuca del departamento de Córdoba*

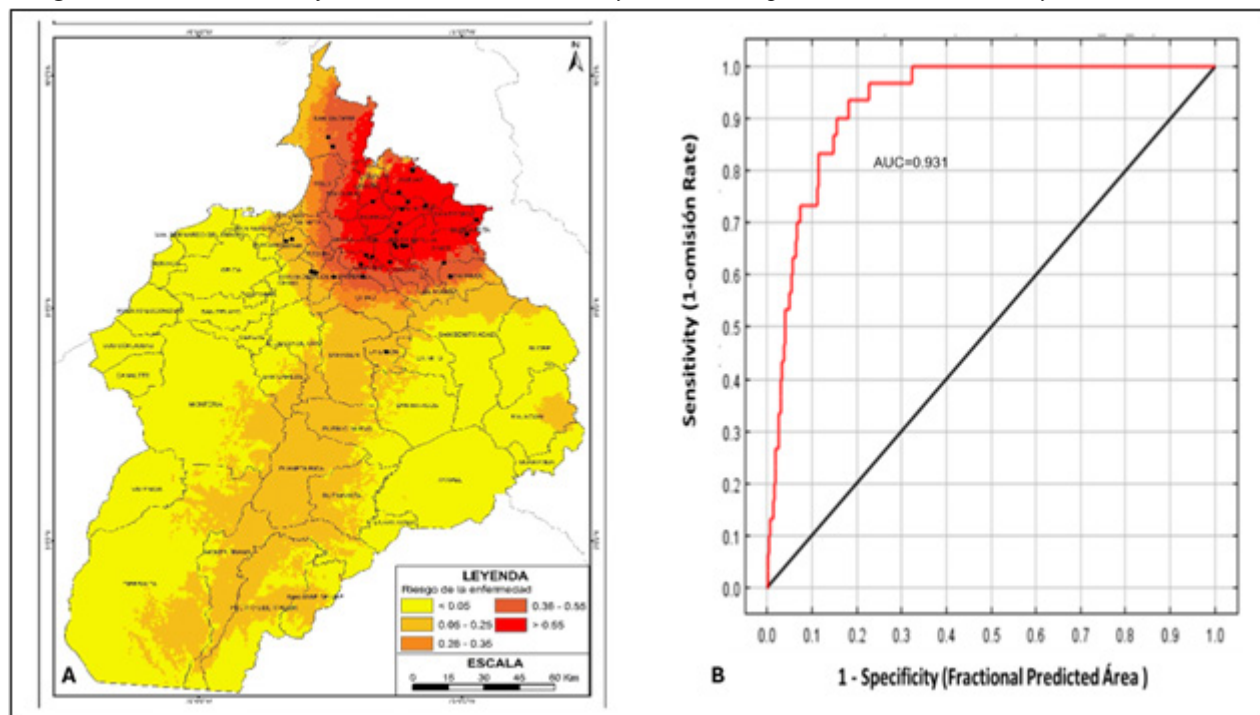
Zona Fisiográfica	Municipio	No. Lotes Muestreados	Resultado de Diagnostico Visual de Cuero De sapo		Prevalencia (%)	Índice De Infección
			(+)	(-)		
Subregión Costera	San Bernardo Del Viento	4	0	4	0	0
	Canalete	3	0	3	0	0
Subregión Bajo Sinú Y Ciénegas	Chimá	2	1	1	50	43
	Purísima	2	0	2	0	
	Momil	3	3	0	100	43
Subregión Sabanas	San Andrés De Sotavento	4	4	0	100	82
	Chinú	3	0	3	0	0
	Sahagún	3	0	3	0	0
	Tuchín	1	0	1	0	0
Subregión Medio Sinú	Ciénaga De Oro	4	0	4	0	0
Total	10	29	8	21	-	-

Nota. Elaboración propia a partir de datos registrados en campo

Estimación del Modelo de predicción de ocurrencia del CS, en el caribe colombiano

En la figura 2A se presenta el modelo de estimación de la distribución potencial del CS realizado a partir de los datos de la sintomatología donde se observa que la presencia de la enfermedad es más frecuente en las zonas agroecológicas de sabanas. En el departamento de Sucre, el CS presentó mayor ocurrencia ($P > 0,55$) en los municipios de Sampedo, Corozal, Betulia, Buenavista, Los palmitos, Colosó, Chalan, Ovejas, Sampedo, Sincelejo, Morroa, Tolú viejo, San Pedro y

Sincé. En la zona del Golfo de Morrosquillo también se observan altas probabilidades de riesgo CS ($P > 0,55$) especialmente en el municipio de San Onofre a espaldas de las faldas de los montes de maría, donde el riesgo de ocurrencia disminuye a medidas que se acerca a las zonas costaneras. Las áreas con menores probabilidades de riesgo se observaron en los municipios ubicados en la zona de San Jorge y gran parte de la Mojana sucreña ($P < 0,05$). El Área Bajo La Curva AUC del modelo fue de 0.931 lo que demuestra un buen desempeño de predicción. (Figura 2B)

Figura 2*Riesgo de desarrollo de la enfermedad CS en cultivos de yuca en los departamentos de Córdoba y Sucre*

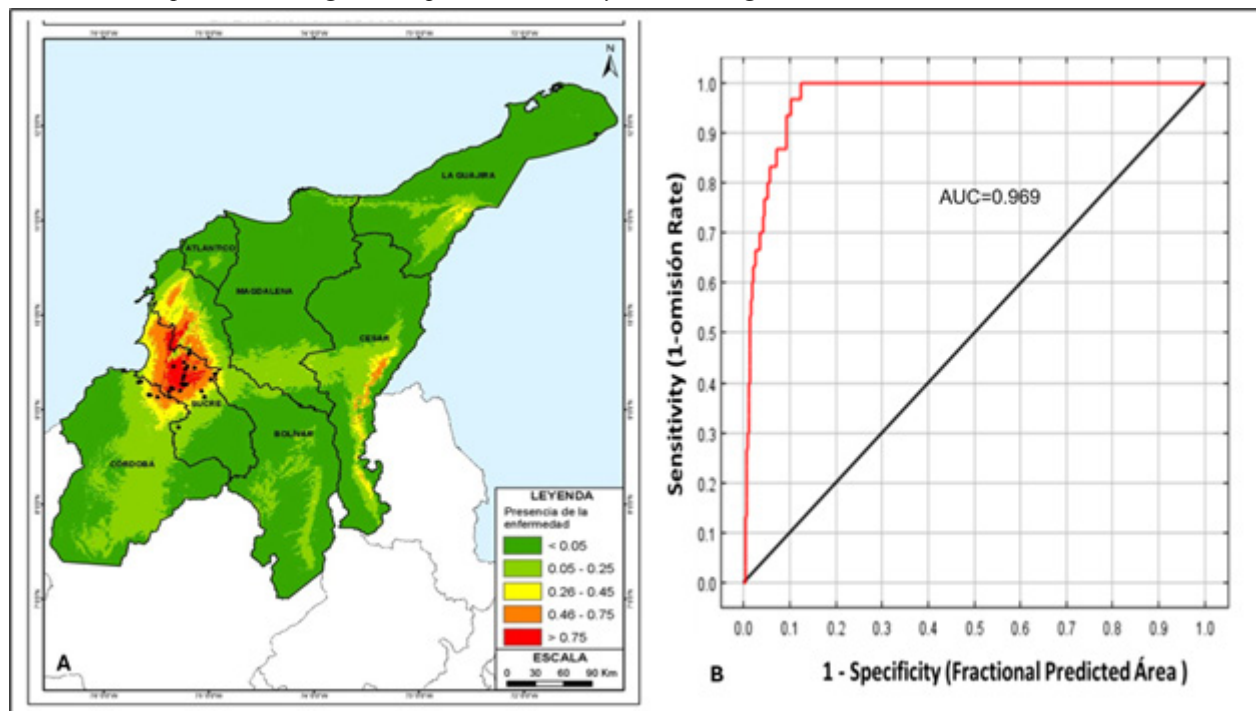
Nota. A Distribución espacial del CS y probabilidad de ocurrencia de acuerdo con la degradación de colores y leyenda. B. Evaluación mediante área bajo la curva AUC = 0,931. Fuente: Elaboración propia a partir de datos registrados en campo

Con relación al análisis potencial de ocurrencia de CS en la región caribe, el modelo permitió estimar que las zonas la zona centro y sur del departamento de Cesar presentan condiciones que pueden favorecer la presencia del CS en las serranías del Perijá límite con Venezuela ($P=0,46-0,75$). La baja Guajira, especialmente la zona

oriental de la sierra nevada de Santa Marta, los montes de oca y la serranía de Perijá, aunque con menor probabilidad de ocurrencia (0.26-0.45)(Figura 3A). Así mismo los valores de AUC (0,969) reflejan la alta efectividad del modelo predictivo basado en los datos de presencia y ausencia de CS en la muestra analizada (Figura 3B)

Figura 3

Distribución espacial del riesgo de CS para cultivos de yuca en la región Caribe Colombiana



Nota. A. Riesgo de desarrollo del CS en la región caribe determinada por la escala gráfica de acuerdo con la degradación de colores y probabilidad de ocurrencia entre <0,05 y > 0,75. B. Evaluación mediante el AUC = 0,969. Fuente: Elaboración propia a partir de datos registrados en campo.

Variables ambientales y su influencia en la distribución del CS

Con relación a las variables ambientales, los valores determinados en la prueba del Jackknife indican los valores de contribución de estas. La variable con los mayores porcentajes de aporte al modelo fue la temperatura máxima del período más caliente (BIO5) y

la que presentó menor valor fue la variable estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación) (BIO15) (Tabla 4). Para una mayor comprensión de los valores de las variables climáticas respecto a los valores que arroja el programa de WorldClim, hay que tener en cuenta que los datos de temperatura están en $^{\circ}\text{C} \times 10$. Esto significa que un valor de 231 representa 23.1°C (Hijmans et al., 2005)

Tabla 4

Porcentaje de contribución de las variables climáticas analizadas en el modelo MaxEnt para estimar el riesgo potencial de cuero de sapo en los departamentos de Córdoba y Sucre

Variable	Percent contribution	Permutation importance
temperatura máxima del período más caliente BIO5	30.4	8.9
temperatura mínima del período más frío BIO6	23.4	10.3
rango medio diurno (temp Max-temp min; promedio mensual) BIO2	20.9	35.8
temperatura mínima del período más frío (BIO6), rango anual de temperatura) BIO7	17.1	33.6
estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación) BIO 15	8.1	11.4

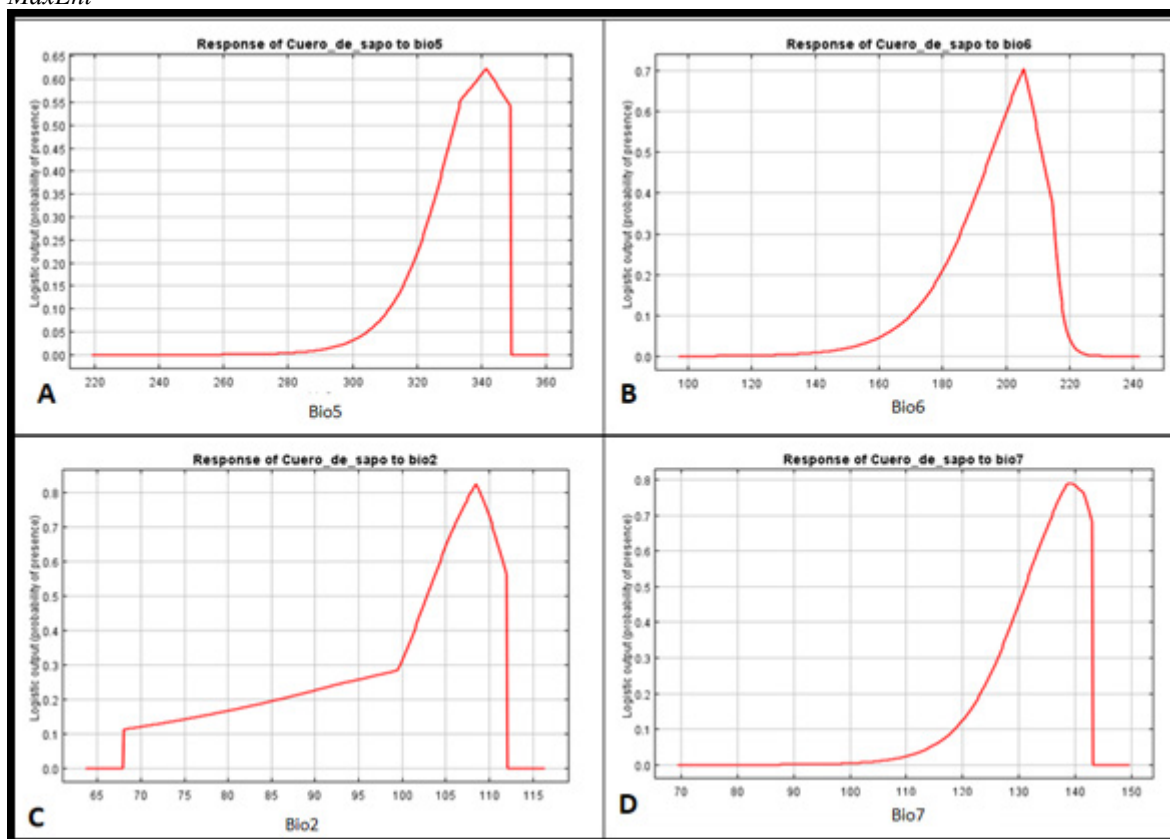
Curvas de respuesta de las variables climáticas estudiadas en el modelo Maxent para la distribución del riesgo potencial de CS

El modelo Maxent estimó que con relación a la variable de temperaturas máximas promedio en el periodo más caliente (BIO5) la enfermedad cuero de sapo aumenta las probabilidades de ocurrencia en valores superiores a 30°C, siendo el óptimo para el desarrollo de la enfermedad ($P=0,55-0,60$) en zonas que registren 32 y 34°C; valores superiores a 35°C disminuyen los riesgos de ocurrencia de CS (Figura 4A). en cuanto a la temperatura mínima del periodo más frío (BIO6) los resultados del modelo

muestran que las mayores probabilidades se generan con valores comprendidos entre los 18 y 22°C (Figura 4B) Con relación a la variable BIO2-Temperatura máxima menos la temperatura mínima promedio mensual se observa que las mayores probabilidades de ocurrencia se presentan en zonas con gradientes de máximas y mínimas temperaturas comprendidos entre los 10 y 11°C ($P=0,3-0,8$) (Figura 4C) y por último el rango anual de temperatura (BIO7) presenta mayores probabilidades de ocurrencia ($P=0,3-0,8$) con valores entre los 13 y 14°C. (figura 4D).

Figura 4

Curvas de respuestas de las variables relacionadas con la temperatura para el estudio en el modelamiento MaxEnt



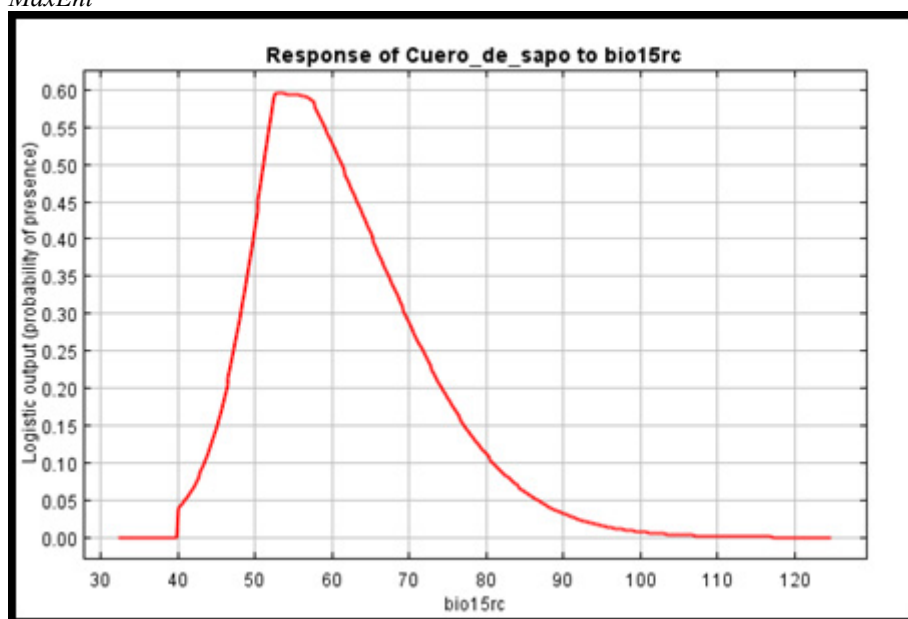
Nota. A. Temperatura máxima promedio en el periodo más caliente (Bio5 expresada en °C x 10) B. Temperatura mínima del periodo más frío (BIO6 expresada en °C x 10). C Temperatura máxima- temp min; promedio mensual (BIO 2 expresada en °C x 10) y D. rango anual de temperatura (BIO5-BIO6) (BIO 7 expresada en °C x 10). El eje X indica la variación del valor climático y el eje Y indica la probabilidad de hallar la enfermedad CS en un área de acuerdo con el valor del parámetro. Fuente: Elaboración propia a partir de datos registrados en campo.

Finalmente, para la estacionalidad de la precipitación (BIO15), las mayores probabilidades de ocurrencia se presentan con valores comprendidos

entre los 50 y 60, a partir del cual decrece llegando a mínimas probabilidades cuando se obtienen valores de estacionalidad altos superiores a los 100 (Figura 5)

Figura 5

Curva de respuesta de la variable estacionalidad de la precipitación en el modelo MaxEnt



Nota. Gráfica de la Curva de respuesta del MaxEnt de la variable, estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de variación) (BIO15). El eje X indica la variación del valor climático y el eje Y indica la probabilidad de hallar la enfermedad CS en un área de acuerdo con el valor del parámetro.

Discusión

Los síntomas observados en las raíces afectadas por CS, coincidió con los descritos por (Álvarez et al., 2015; Pardo et al., 2022b). La prevalencia del CS en el departamento de Córdoba fue baja comparándose con la encontrada en Sucre, identificándose en tres municipios: dos en el Bajo Sinú con prevalencia entre 50% y 100%, y uno en la región de sabanas con el 100% (Tabla 2 y 3). La información encontrada indica que la enfermedad se encuentra ampliamente distribuida en las zonas productoras de yuca de la región caribe, coincidiendo con los trabajos realizados por (Pardo et al., 2022b; Prado García, 2013). Lo anterior evidencia que para esta zona fisiográfica la severidad de la enfermedad es más intensa, en las sub-zonas de las sábanas, encontrando plantas totalmente afectadas disminuyendo así los rendimientos del cultivo tal como lo explica investigaciones realizadas por (Calvert et al., 2001) quienes manifiestan que la expresión de los síntomas de CS en las raíces, varían desde muy suaves a severos, dependiendo de la variedad, edad de la planta y factores climáticos principalmente de la temperatura. Las condiciones secas o calientes tienden a inhibir el desarrollo de los síntomas, mientras que condiciones más frescas favorecen el desarrollo de éstos, lo que puede estar incidiendo en la severidad de CS registrada para estas zonas de estudio. El ajuste a la escala de severidad propuesta por Álvarez et al., 2014b, permitió identificar la severidad más ajustada a los síntomas observados en campo, encada planta evaluada, dado que una planta puede producir entre 5 y 12 raíces y no todas las raíces están afectadas por la enfermedad.

La alta correlación entre los parámetros de la incidencia y la severidad de la enfermedad indicó que para este tipo de enfermedad al momento de realizar muestreos para CS, el evaluador podrá escoger indistintamente, bien sea la incidencia o la severidad tal como lo reportan (Garcés-Fiallos et al., 2011; Otiniano et al., 2019). En cuanto a la distribución espacial empleando el modelo de Maxent probado a través del área bajo la curva AUC, presentó una probabilidad AUC= 0.931 de ocurrencia en los departamentos de Córdoba y Sucre y de un AUC= 0.969 para la región Caribe colombiana, demostrando así que el modelo fue eficiente, tanto para identificar como para predecir la distribución espacial del CS.

El estudio de las variables climáticas es un punto de partida para entender la ocurrencia de la enfermedad en términos de factores ambientales que condicionan o favorecen la presencia o ausencia de esta. En este sentido (Alvarez et al., 2015) reporta que los factores climáticos de precipitación y temperatura están relacionados con la expresión natural de la enfermedad; igualmente Calvert et al., (2001), determinaron que la expresión de los síntomas del CS, en la planta es variable y va a depender de la temperatura y el genotipo.

En relación con las variables climáticas y su efecto en los posibles agentes causales del Cuero de sapo, (Gómez, 2022; Rodríguez, 2025) Indican la asociación entre vectores biológicos y la enfermedad CS lo que resulta fundamental contar con datos precisos sobre las condiciones ambientales que favorecen la actividad

de los vectores tales como temperatura, humedad relativa y precipitación para la toma de decisiones y estrategia de manejo. Por su parte Nuez et al., 2003 citado por (Velásquez-Valle et al., 2014) señalan que la epidemiología de virus y fitoplasmas están influenciados por factores agroclimáticos como la temperatura, humedad, forma del cultivo entre otros, los cuales inciden sobre la expansión de estos patógenos, que de una u otra forma afectan al cultivo y al patógeno modulando la interacción entre ambos. Además, señala que esta interacción se vuelve más compleja cuando existe un vector y es necesario considerar la acción de todos los factores agroclimáticos sobre este organismo y la relación que pueda establecer con el cultivo y sus patógenos virales.

Conclusiones

El presente estudio ha demostrado que el nicho ecológico del Cuero de Sapo (CS) en el cultivo de la yuca está determinado en gran medida por la temperatura, siendo óptima entre 32 y 34°C y mínima entre 18 y 22°C. El modelo MaxEnt identificó que en las áreas con mayor prevalencia de la enfermedad y predecir las zonas con mayor riesgo de desarrollo del CS. El hecho de identificar las temperaturas que favorecen el desarrollo de la enfermedad sugiere el monitoreo constante de este factor, con el fin de aplicar medidas preventivas de manera oportuna; sin olvidar la necesidad de plantar nuevos cultivos con semilla limpia de patógenos sistémicos.

El análisis del diagnóstico visual mostró que la enfermedad presenta mayor prevalencia en las zonas de sabanas, coincidiendo con lo encontrado en el modelo MaxEnt. El modelo del riesgo potencial de la enfermedad a nivel de la región Caribe indica una alta probabilidad de ocurrencia ($P=0.46-0.75$) en gran parte del departamento del Cesar y valores medios de probabilidad en la Guajira. Estos resultados subrayan la necesidad de elaborar estrategias de manejo basadas en el monitoreo climático y la selección de semillas libres de la enfermedad.

Agradecimientos

Esta investigación tuvo el apoyo financiero del Centro de Agricultura Tropical-CIAT a través del proyecto *Innovaciones tecnológicas en el manejo integrado del Cuero de Sapo de la yuca (Manihot esculenta Crantz): Estrategias para reducir el impacto de la enfermedad por efectos del cambio climático en Colombia, Costa Rica y Paraguay-Fontagro*. Instituto Colombiano Agropecuario ICA. Universidad de Córdoba, Colombia, Facultad de Ciencias agrícolas, Grupo de Investigación Agricultura Sostenible

Contribución de los autores

Lilibeth Tordecilla Zumaque: responsable de su trabajo de grado tesis Maestría, planeación del proyecto, toma

y análisis de datos, manejo muestras en laboratorio, elaboración de informes y escrito final.

Rodrigo Orlando Campo Arana: Director proyecto de grado, planeación proyecto, análisis de datos, elaboración informe final.

Oscar Alberto Burbano Figueroa: planeación proyecto, análisis de datos, elaboración informe final.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- AGRONET. (2024). – *Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario Colombiano*. (2024). *Cifras de producción agropecuaria en Colombia – Yuca 2022*. . https://agronet.gov.co/estadisticas/agricola?producto_nacional=13120101&anio_inicio_nacional=2022&anio_fin_nacional=2022&ciclo_nacional_filter=.
- AGROSAVIA. (2022). *Yuca Pais*. <https://www.agrosavia.co/noticias/yuca-pais>.
- Aguilera Díaz, M. M. (2012). *La yuca en el Caribe colombiano : de cultivo ancestral a agroindustrial*. <https://doi.org/10.32468/dtseru.158>
- Alvarez, E., Gómez Bonilla, Y., Campo Arana Rodrigo, & Zacher de Martinez, M. (2015). *Informe técnico Final 'Innovaciones tecnológicas en el manejo integrado del Cuero de Sapo de la yuca (Manihot esculenta Crantz): Estrategias para reducir el impacto de la enfermedad por efectos del cambio climático en Colombia, Costa Rica y Paraguay'*. <https://old.fontagro.org/new/uploads/adjuntos/Informe-Final-Fontagro-31-Julio.pdf>
- Álvarez, E., Pardo, J. M., Mejía, J. F., Santos de Oliveira, S. A., Zacher, M., Cardozo, L., & Gómez, Y. (2014a). *Manejo del 'Cuero de sapo' enfermedad limitante de la yuca*. <https://cgspace.cgiar.org/items/58fac8b8-bfa8-430c-bfc4-160f0c7442e2>.
- Álvarez, E., Pardo, J. M., Mejía, J. F., Santos de Oliveira, S. A., Zacher, M., Cardozo, L., & Gómez, Y. (2014b). *Manejo del 'Cuero de sapo' enfermedad limitante de la yuca*. In <https://cgspace.cgiar.org/items/58fac8b8-bfa8-430c-bfc4-160f0c7442e2>.
- Álvarez, E., Pardo, J. M., Mejía, J. F., Santos de Oliveira, S. A., Zacher, M., Cardozo, L., & Gómez, Y. (2015). *Manejo del 'Cuero de sapo' enfermedad limitante de la yuca*. <https://cgspace.cgiar.org/items/58fac8b8-bfa8-430c-bfc4-160f0c7442e2>.
- Aportes y perspectivas del mejoramiento genético de yuca. (s.d.). In <https://editorial.agrosavia.co/index.php/publicaciones/catalog/download/315/308/1875-1?inline=1>.

- Betancourth, C., Pardo, J. M., Muñoz, J., & Cabrera, E. A. (2019a). Isolation of phytoplasmas associated to frog skin disease in cassava. *Revista U.D.C.A Actualidad and Divulgacion Cientifica*, 22. <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1177>
- Betancourth, C., Pardo, J. M., Muñoz, J., & Cabrera, E. A. (2019b). Isolation of phytoplasmas associated to frog skin disease in cassava. *Revista U.D.C.A Actualidad and Divulgacion Cientifica*, 22. <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1177>
- Byeon, D. hyeon, Jung, S., & Lee, W. H. (2018). Review of CLIMEX and MaxEnt for studying species distribution in South Korea. In *Journal of Asia-Pacific Biodiversity* (T. 11, pp. 325–333). National Science Museum of Korea. <https://doi.org/10.1016/j.japb.2018.06.002>
- Caicedo, S. M., Jimenez, J., Pardo, J. M., & Cuéllar, W. J. (2023, november 7). La enfermedad cuero de sapo. <https://cgspage.cgiar.org/items/01abf8c7-d362-4109-ba50-d8e50db787c6>.
- Calvert, L. A., Cuervo Ibáñez, M., & Lozano Potes, I. (2012). Cassava viral diseases of South America. In *Cassava in the third millennium: Modern production, processing, use and marketing system* (pp. 309–318). <https://cgspage.cgiar.org/items/c180c3a1-9759-4deb-8fe0-bd4152ba01f8>
- Calvert, L. A., Cuervo Ibáñez, M., & Pineda López, B. (2001). *Cuero de Sapo una Enfermedad que ataca la yuca*. http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos/Ciat/cuero_de_sapo.pdf
- Carvajal-Yepes, M., Olaya, C., Lozano, I., Cuervo, M., Castaño, M., & Cuellar, W. J. (2014). Unraveling complex viral infections in cassava (*Manihot esculenta* Crantz) from colombia. *Virus Research*, 186, 76–86. <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2013.12.011>
- Cock, J. H., & Connor, D. J. (2020). Cassava. In *Crop Physiology Case Histories for Major Crops* (pp. 588–633). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819194-1.00019-0>
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37, 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Fithian, W., Elith, J., Hastie, T., & Keith, D. A. (2014, augustus). *Bias Correction in Species Distribution Models: Pooling Survey and Collection Data for Multiple Species*.
- Freitas, E. L., Brito, A. C., de Oliveira, S. A. S., & de Oliveira, E. J. (2020). Early diagnosis of cassava frog skin disease in powdered tissue samples using near-infrared spectroscopy. *European Journal of Plant Pathology*, 156, 547–558. <https://doi.org/10.1007/s10658-019-01904-x>
- Garcés-Fiallos, C. R., Rafael, F., Forcelini, J., & Alberto, C. (2011). Agronomía Mesoamericana. *Brasil Agronomía Mesoamericana*, 22(2), 387–395. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43722407015>
- Gómez Bonilla, Y., Torres Portuguese, S., Álvarez, E., Pardo, J. M., Aguilar Brenes, E., & Solórzano Arroyo, J. A. (2015). Manejo de la semilla y de la enfermedad de cuero de sapo en yuca. In <https://cgspage.cgiar.org/items/6fa4c1dc-786a-49fc-8ca7-d22b3171a1dd>.
- Gómez-Bonilla, Y. (2022). *Insectos Portadores del Fitoplasma asociado a la enfermedad Cuero de sapo*. 15, 98–115. [https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Ha-2022\(Ano15-N1\)p98.pdf](https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Ha-2022(Ano15-N1)p98.pdf)
- IDEAM. (2025). *Datos climáticos del departamento de Córdoba, Colombia*. <https://www.ideam.gov.co/hdl.handle.net/10568/70086>
- Jimenez, J., Caicedo, S., Pardo, J. M., Gil-Ordóñez, A., Alvarez-Quinto, R., Mollov, D., & Cuellar, W. J. (2024). Single torradovirus infections explain the mysterious cassava frog skin disease in the Americas. *Scientific Reports*, 14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81142-2>
- Kogo, B. K., Kumar, L., Koech, R., & Kariyawasam, C. S. (2019). Modelling climate suitability for rainfed maize cultivation in Kenya using a maximum entropy (MAXENT) approach. *Agronomy*, 9. <https://doi.org/10.3390/agronomy9110727>
- Koinuma, H., Miyazaki, A., Wakaki, R., Fujimoto, Y., Iwabuchi, N., Nijo, T., Kitazawa, Y., Shigaki, T., Maejima, K., Yamaji, Y., & Namba, S. (2018). First report of ‘Candidatus Phytoplasma pruni’ infecting cassava in Japan. *Journal of General Plant Pathology*, 84, 300–304. <https://doi.org/10.1007/s10327-018-0787-2>
- MADR. (2017). *Documento Clúster de Tubérculos en los Departamentos de Bolívar, Córdoba, y Sucre Para las Líneas productivas de Ñame, Yuca y Batata*. <https://sioc.minagricultura.gov.co/DocumentosContexto/S1722-DOCUMENTO%20CLUSTER%20TUBE%CC%81RCULOS%20%20PARA%20LA%20COSTA%20ATLANTICA.pdf>
- Moreno-Altamirano, A., López-Moreno, S., & Corcho-Berdugo, A. (2000). Principales medidas en epidemiología. In *Salud Publica de Mexico* (T. 42, pp. 337–348). Instituto Nacional de Salud Publica. <https://doi.org/10.1590/S0036-36342000000400009>
- Munar Samboní, A. M., Rodríguez Carlosama, A., & Muñoz España, J. L. (2021). Potenciales áreas cultivables de pasifloras en una región tropical

- considerando escenarios de cambio climático. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 13, 109–129. <https://doi.org/10.22490/21456453.4637>
- Murrall, D. J., Nault, L. R., Hoy, C. W., Madden, L. V., & Miller, S. A. (1996). Effects of temperature and vector age on transmission of two Ohio strains of aster yellows phytoplasma by the aster leafhopper (Homoptera: Cicadellidae). *Journal of Economic Entomology*, 89, 1223–1232. <https://doi.org/10.1093/jee/89.5.1223>
- Organization For Economic Cooperation and Development, O., & Food And Agriculture Organization, F. (2023). *OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2023-2032*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/2ad6c3ab-es>
- Osorio Almanza, L., Burbano Figueroa, O., Arcila C., A. M., Vásquez B., A. M., Carrascal-Pérez, F., & Romero F., J. (2017). Distribución espacial del riesgo potencial de marchitamiento del aguacate causado por *Phytophthora cinnamomi* en la subregión de Montes de María, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11, 273–285. <https://doi.org/10.17584/rcch.2017v11i2.7329>
- Otiniano, A. J., Ventura, R. B., Huamán, L. A., Vera, N. J., Cepero, V. C., & Amez, S. B. (2019). Relación entre la incidencia y la severidad de la roya del café (*Hemileia vastatrix*) en San Ramón, Chanchamayo, Perú. <https://revistas.utb.edu.ec/index.php/sr/article/view/706>, 4, 1–9. <https://revistas.utb.edu.ec/index.php/sr/article/view/706>
- Pardo, J. M., Alvarez, E., Becerra Lopez-Lavalle, L. A., Olaya, C., Leiva, A. M., & Cuellar, W. J. (2022a). Cassava Frogskin Disease: Current Knowledge on a Re-Emerging Disease in the Americas. In *Plants* (T. 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/plants11141841>
- Pardo, J. M., Alvarez, E., Becerra Lopez-Lavalle, L. A., Olaya, C., Leiva, A. M., & Cuellar, W. J. (2022b). Cassava Frogskin Disease: Current Knowledge on a Re-Emerging Disease in the Americas. In *Plants* (T. 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/plants11141841>
- Phillips, S. B., Aneja, V. P., Kang, D., & Arya, S. P. (2006). Modelling and analysis of the atmospheric nitrogen deposition in North Carolina. *International Journal of Global Environmental Issues*, 6, 231–252. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Prado García, J. M. (2013). Desarrollo de una metodología de PCR en Tiempo Real para detección y cuantificación de fitoplasma 16SrIII-L y reovirus CFSV asociados con la enfermedad del Cuero de Sapo en yuca. In <https://repositorio.unal.edu.co/items/b8c91190-3832-4088-b2e6-fe6840447b85>
- Rodríguez, V. (2025). *Colectas de insectos vectores asociados a la enfermedad en cultivares de yuca– Fase II*. <https://doi.org/10.15472/4kud6n>
- Rosero Alpalá, E. A., Caballos Lascano, H., & Rodríguez Henao, E. (2023). Aportes y perspectivas del mejoramiento genético de yuca para el fortalecimiento de su red de valor en Colombia. In *Aportes y perspectivas del mejoramiento genético de yuca para el fortalecimiento de su red de valor en Colombia*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.analisis.7406276>
- Suárez, L., & Mederos, V. (2011). Apuntes sobre el cultivo de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz). Tendencias actuales. *Cultivos Tropicales*, 32, 27–35. <https://ediciones.inca.edu.cu/index.php/ediciones/article/view/35/pdf>
- Swets, J. A. (1988). Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 240, 1285–1293. <https://doi.org/10.1126/science.3287615>
- Taborda Andrade, L. A., Tran, T., Silva Acosta, G. E., & Contreras Valencia, K. V. (2023). Uso, demanda y prospectiva de la producción de yuca en Colombia. In Rosero Alpalá Elvia Amparo, Ceballos Lascano Hernán, & Rodríguez Henao Eberto (Curs.), <https://repository.agrosavia.co/items/ef36f8c4-220e-4c47-b6b5-826f70b2cf9f>
- Velásquez-Valle, R., Reveles-Hernández, M., Chew-Medinaveitia, Y. I., & Reveles-Torres, L. R. (2017). Efecto del tratamiento térmico sobre la presencia de virus en bulbos de ajo (*Allium sativum* L.). https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1853-86652017000100013&script=sci_arttext
- Velásquez-Valle, R., Roberto Reveles-Torres, L., Armando Mauricio-Castillo, J., Mena-Covarrubias, J., Domingo Amador-Ramírez, M., Salas-Muñoz, S., Reveles-Hernández, M., Creamer, R., Ileana Chew-Madinaveitia, Y., María Chapa-Oliver, Á., Mejía-Teniente, L., Martín González-Chavira, M., & Ángel Cid-Ríos, J. (2014). *VIRUS Y FITOPLASMAS DE CHILE: UNA PERSPECTIVA REGIONAL* (Libro Técnico N°10, T. 14). <http://zacatecas.inifap.gob.mx/publicaciones/viFitoChileRegional.pdf>
- Wang, F., Yuan, X., Sun, Y., & Liu, Y. (2024). Species distribution modeling based on MaxEnt to inform biodiversity conservation in the Central Urban Area of Chongqing Municipality. *Ecological Indicators*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111491>
- Xiao, S., Li, S., Huang, J., Wang, X., Wu, M., Karim, R., Deng, W., & Su, T. (2024). Influence of climate factors on the global dynamic distribution of *Tsuga* (Pinaceae). *Ecological Indicators*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111533>