

# **Zonificación potencial para la siembra de *Coffea canephora* (Robusta) en el departamento del Valle del Cauca**

**Daniel Gómez Arbeláez**

Universidad de Manizales  
Facultad de Ciencias e Ingeniería  
Maestría en Tecnologías de la Información Geográfica  
Manizales, 2024



# **Zonificación potencial para la siembra de *Coffea canephora* (Robusta) en el departamento del Valle del Cauca**

**Daniel Gómez Arbeláez**

Propuesta de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al  
título de Magíster en Tecnologías de la Información Geográfica

Director:

Ph.D. Andrés Mauricio Villegas Hincapié

Línea de Investigación:

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Universidad de Manizales  
Facultad de Ciencias e Ingeniería  
Maestría en Tecnologías de la Información Geográfica  
Manizales, 2024



## Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar la zonificación potencial para la siembra de café Robusta en 33 de los municipios localizados en el valle de la cuenca del río Cauca correspondientes al departamento del Valle del Cauca en Colombia, a escala 1:25.000, a partir de los criterios establecidos por la FAO para el cultivo de café Robusta respecto al clima (Temperatura media, radiación solar, temperatura mínima, temperatura máxima, precipitación anual, y humedad relativa), Topografía (Altitud, pendiente) y variables asociadas al suelo como pH, contenido de materia orgánica, capacidad catiónica, contenido de fósforo, calcio, magnesio y potasio y porcentaje de arena, identificando áreas con potencial para el establecimiento del cultivo en un futuro en zonas no convencionales para la siembra de café. Como resultado se identificaron 337092.4 hectáreas como áreas adecuadas y 57527.2 hectáreas como áreas óptimas para el potencial cultivo de café Robusta de el departamento del Valle del Cauca en 356 veredas de los municipios de Alcalá, Andalucía, Ansermanuevo, Bolívar, Bugalagrande, Caicedonia, Cali, Candelaria, Cartago, El Águila, El Cerrito, Florida, Ginebra, Guacarí, Guadalajara De Buga, Jamundí, La Unión, La Victoria, Obando, Palmira, Pradera, Riofrío, Roldanillo, San Pedro, Sevilla, Toro, Trujillo, Tuluá, Ulloa, Vijes, Yotoco, Yumbo y Zarzal

**Palabras clave:** zonificación potencial, *coffea canephora*, cultivo, café.



# Contenido.

	Pág.
<b>1. Planteamiento del problema de investigación y su justificación.....</b>	<b>9</b>
1.1 Descripción del área problemática .....	9
1.2 Formulación del problema .....	10
1.3 Justificación.....	11
<b>2. Antecedentes.....</b>	<b>13</b>
<b>3. Objetivos.....</b>	<b>20</b>
3.1 Objetivo general .....	20
3.2 Objetivos específicos .....	20
<b>4. Referente Contextual .....</b>	<b>21</b>
<b>5. Referente teórico.....</b>	<b>23</b>
5.1 Descripción y características del café Robusta .....	23
5.1.1 Beneficios del café Robusta.....	23
5.1.2 Requisitos ambientales para la siembra de café Robusta.....	24
5.1.3 Estudios en Colombia sobre café robusta.....	24
5.2 Sistemas de Información Geográfica para la zonificación potencial de café robusta.....	25
5.2.1 Insumos cartográficos.....	25
5.2.2 Análisis multicriterio de elementos.....	26
<b>6. Hipótesis de investigación .....</b>	<b>26</b>
<b>7. Metodología.....</b>	<b>27</b>
7.1 Enfoque metodológico.....	27
7.2 Tipo de estudio.....	27
7.3 Diseño de la investigación.....	27
7.4 Población o unidad de trabajo .....	27
7.5 Muestra y muestreo.....	28
7.6 Técnicas e instrumentos de recolección de información.....	28
7.6.1 Temperatura media .....	30
7.6.2 Radiación solar .....	31
7.6.3 Temperatura mínima .....	32
7.6.4 Temperatura máxima.....	33
7.6.5 Precipitación media anual.....	34
7.6.6 Humedad relativa.....	35
7.6.7 Altitud .....	36
7.6.8 Pendiente .....	37
7.6.9 Suelo .....	38
7.7 Plan de análisis .....	39
7.7.1 Procesamiento y reclasificación de la información recopilada.....	39
7.7.2 Temperatura media .....	40
7.7.3 Radiación solar .....	41
7.7.4 Temperatura mínima .....	42
7.7.5 Temperatura máxima.....	43
7.7.6 Precipitación media anual.....	44

---

7.7.7	Humedad relativa .....	45
7.7.8	Altitud .....	46
7.7.9	Pendiente .....	47
7.7.10	pH .....	48
7.7.11	Contenido de materia orgánica.....	49
7.7.12	Capacidad de intercambio catiónico .....	50
7.7.13	Fósforo.....	51
7.7.14	Calcio .....	52
7.7.15	Magnesio.....	53
7.7.16	Potasio .....	54
7.7.17	Arena .....	55
7.7.18	Sumatoria de las variables reclasificadas .....	56
7.7.19	Áreas excluidas del análisis.....	61
7.7.20	Validación de los resultados .....	62
<b>8.</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>67</b>
8.1	Zonificación potencial .....	67
8.2	Áreas potenciales para la siembra de café robusta.....	71
<b>9.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>75</b>
<b>10.</b>	<b>Recomendaciones .....</b>	<b>76</b>

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Localización del departamento del Valle del Cauca.....	10
Figura 2. Localización del área de estudio.....	22
Figura 3. Fases metodológicas de la investigación.....	27
Figura 4. Requisitos para la siembra de café Robusta de la FAO. Tomado y modificado de FAO.....	29
Figura 5. insumos utilizados para la zonificación potencial de café robusta en el centro – sur de Caldas, tomado de Villegas 2023. ....	29
Figura 6. Temperatura media resultado de la Ecuación 1. Temperatura media. ....	30
Figura 7. Radiación solar.....	31
Figura 8. Temperatura mínima resultado de la Ecuación 2. Temperatura mínima. ....	32
Figura 9. Temperatura máxima resultado de la Ecuación 3. Temperatura máxima. ....	33
<i>Figura 10.</i> Precipitación media anual.....	34
<i>Figura 11.</i> Humedad relativa. ....	35
<i>Figura 12.</i> Altitud. ....	36
<i>Figura 13.</i> Pendientes del terreno.....	37
<i>Figura 14.</i> Localización de muestreos del suelo. ....	38
Figura 15. Temperatura media reclasificada.....	40
<i>Figura 16.</i> Radiación solar reclasificada. ....	41
<i>Figura 17.</i> Temperatura mínima reclasificada.....	42
Figura 18. Temperatura máxima reclasificada. ....	43
Figura 19. Precipitación media anual reclasificada. ....	44
Figura 20. Humedad relativa reclasificada.....	45
Figura 21. Altitud reclasificada.....	46
Figura 22. Pendientes reclasificadas. ....	47
Figura 23. pH reclasificado. ....	48
Figura 24. Contenido de materia orgánica reclasificado. ....	49
Figura 25. Capacidad de intercambio catiónico reclasificado.....	50
Figura 26. Fósforo reclasificado. ....	51
Figura 27. Calcio reclasificado.....	52
Figura 28. Magnesio reclasificado. ....	53
Figura 29. Potasio reclasificado.....	54
Figura 30. Porcentaje de arena reclasificado.....	55
Figura 31. Zonificación potencial según el clima.....	57
Figura 32. Zonificación potencial según la topografía. ....	58
Figura 33. Zonificación potencial según el suelo. ....	59
Figura 34. Índice de zonificación potencial. ....	60
Figura 35. Áreas extraídas de la zonificación potencial. ....	61
Figura 36. Localización de puntos de validación.....	63
Figura 37. Coberturas de la tierra en el área potencial. ....	65
Figura 38. Áreas adecuadas y óptimas de los municipios para el cultivo de café Robusta. ....	68

---

Figura 39. Zonificación potencial de Café robusta en el departamento del Valle del Cauca. ....	70
Figura 40. Áreas potenciales para la siembra de café robusta de los municipios de Candelaria, Zarzal, Andalucía, La Victoria y Cartago. ....	73
Figura 41. Zonificación potencial en el municipio de Palmira .....	74

## Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Peso ponderado asignado Temperatura media</i> .....	40
Tabla 2. <i>Peso ponderado asignado Radiación solar</i> .....	41
Tabla 3. <i>Peso ponderado asignado temperatura mínima</i> .....	42
Tabla 4. <i>Peso ponderado temperatura máxima</i> .....	43
Tabla 5. <i>Peso ponderado asignado precipitación media anual</i> .....	44
Tabla 6. <i>Peso ponderado asignado humedad relativa</i> .....	45
Tabla 7. <i>Peso ponderado asignado altitud</i> .....	46
Tabla 8. <i>Peso ponderado asignado pendiente</i> .....	47
Tabla 9. <i>Peso ponderado asignado pH</i> .....	48
Tabla 10. <i>Peso ponderado asignado contenido materia orgánica</i> .....	49
Tabla 11. <i>Peso ponderado asignado capacidad de intercambio catiónico</i> .....	50
Tabla 12. <i>Peso ponderado asignado Fósforo</i> .....	51
Tabla 13. <i>Peso ponderado asignado Calcio</i> .....	52
Tabla 14. <i>Peso ponderado asignado Magnesio</i> .....	53
Tabla 15. <i>Peso ponderado asignado Potasio</i> .....	54
Tabla 16. <i>Peso ponderado asignado Arena</i> .....	55
Tabla 17. <i>Tipo de cobertura en los puntos de validación</i> .....	62
Tabla 18. <i>Tipos de coberturas de la tierra en el área de estudio</i> .....	64
Tabla 19. <i>Áreas adecuadas y óptimas de los municipios para el cultivo de café Robusta</i> .....	69
Tabla 20. <i>Áreas potenciales para la siembra de café robusta de los municipios de Candelaria, Zarzal, Andalucía, La Victoria, Cartago, Obando, Bugalagrande, Guacarí, Palmira, El Cerrito, San Pedro, La Unión, Ansermanuevo, Yotoco y Jamundí</i> .....	71
Tabla 21. <i>Zonificación potencial en el municipio de Palmira</i> .....	74

## Introducción

El mercado del café en Colombia es de vital importancia tanto a nivel nacional como internacional debido a su destacado papel como uno de los principales productores mundiales de este producto. La calidad del café colombiano es ampliamente reconocida y considerada entre las mejores del mundo. La industria cafetera colombiana se compone principalmente de pequeños productores, aunque también existen empresas de mayor tamaño y cooperativas que participan activamente en la producción, comercialización y exportación del café. La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia desempeña un papel crucial en la regulación y promoción del café colombiano, así como en la implementación de programas destinados a apoyar a los agricultores y mejorar la sostenibilidad de toda la industria. A nivel nacional, el café es un elemento integral de la cultura colombiana y se consume en todo el país en una variedad de formas. En el ámbito internacional, Colombia exporta la mayor parte de su café, llegando a destinos que incluyen países de América del Norte, Europa y Asia.

El mercado mundial del café está experimentando un crecimiento en la producción, especialmente en países como Brasil, Vietnam y Colombia, a pesar de enfrentar desafíos significativos como el cambio climático y enfermedades de las plantas que continúan afectando la oferta. Paralelamente, se observa un aumento en la demanda global, impulsada por mercados emergentes y un creciente aprecio por el café de alta calidad. Los precios del café muestran una volatilidad notable, influenciada por diversos factores como las condiciones climáticas y los cambios en la oferta y la demanda. La sostenibilidad emerge como un tema crucial en la industria, con un interés creciente en el café producido de manera ética y sostenible, reflejando una tendencia hacia prácticas más responsables y conscientes con el medio ambiente y las comunidades productoras.

Las dos principales especies de café son *Coffea arabica* (café arábica) y *Coffea canephora* (café robusta). El café arábica es reconocido por su sabor suave y complejo, con notas afrutadas y florales, y generalmente se considera de mayor calidad en comparación con el café robusta. Por el contrario, el café robusta tiende a tener un sabor más fuerte y amargo, con un contenido de cafeína más elevado. Ambas especies se cultivan en diversas regiones del mundo y presentan características únicas que las hacen adecuadas para distintos gustos y aplicaciones. Por lo general, el café arábica es más ampliamente cultivado y valorado, mientras que el café robusta destaca por su resistencia a enfermedades y condiciones climáticas adversas, así como por su uso en mezclas de café y la producción de café instantáneo.

Colombia es reconocida por ser uno de los principales productores de café arábica, una especie apreciada por su sabor suave, aroma distintivo y baja acidez. Este café goza de una alta demanda en el mercado mundial y cuenta con denominación de origen otorgada por la Federación Nacional de Cafeteros (FNC).

En muchos territorios de Colombia, donde tradicionalmente se cultivaba café arábica y que, debido al cambio climático, los cultivos se han visto afectados por enfermedades como la roya y la broca, el café robusta emerge como una opción ideal para implementar en estas zonas. Este tipo de café es valorado por su resistencia a enfermedades y condiciones climáticas adversas. La introducción del café robusta tiene como objetivo satisfacer la demanda interna de café, dado que Colombia importa cerca de dos millones de sacos al año para cubrir esta necesidad. Además, se busca ofrecer a la población rural una opción de ingresos alternativa a través del cultivo de robusta en zonas potenciales.

Cada vez se reconoce más la importancia de seleccionar cuidadosamente la localización de zonas para cultivar las variedades óptimas de café, lo cual es fundamental para garantizar una producción y comercialización sostenibles del cultivo. En este sentido, resulta crucial identificar las zonas y áreas adecuadas para el cultivo del café robusta, el cual se valora por su resistencia a enfermedades y condiciones climáticas adversas. La zonificación potencial del café robusta en el Valle del Cauca permitirá determinar las ubicaciones y cuantificar las áreas con potencial para este tipo de cultivo. Esto se convertirá en una herramienta valiosa para la toma de decisiones, ya que permitirá a diversos sectores, tanto públicos como privados, evaluar la viabilidad de introducir este cultivo en la región y conocer las áreas delimitadas cartográficamente como idóneas para su implementación.



# 1. Planteamiento del problema de investigación y su justificación

## 1.1 Descripción del área problemática

En Colombia, desde los años 90, varias instituciones han propuesto ampliar la variedad de cultivos de café en la cadena de abastecimiento, en particular, considerando la introducción del café Robusta en regiones cafetaleras poco tradicionales, no obstante, la estrategia cafetalera encabezada por las Federaciones Nacionales de Cafeteros (FNC) no recibió aprobación (Echavarría et al., 2014) (Villegas et al., 2023a).

Autores como Campuzano-Duque et al. 2021, publicaron la evaluación de las oportunidades de cultivo de café Robusta en Colombia en estas zonas no tradicionales, destacando su viabilidad a lo largo de las costas del Caribe y el Pacífico, así como en las regiones de las tierras bajas orientales de la Orinoquía y la Altillanura, pero sin tomar en cuenta regiones con cultivos de café que también podrían ser candidatas para la producción de café Robusta, como es el caso del departamento del Valle del Cauca.

Colombia durante el año 2023, importó el equivalente a 2,2 millones de sacos de café para satisfacer la demanda interna, en este caso, el 90% sacos importados fueron de café robusta (Colprensa, 2023); por tanto, como una medida de protección del ingreso del productor, se plantea la necesidad de establecer cultivos en Colombia de café Robusta, de manera que permita un sustitución de importaciones.

En este trabajo se propone realizar la zonificación potencial para la siembra de café Robusta, localizada en el Departamento del valle del Cauca (Figura 1), que permita identificar las áreas potenciales para su siembra.



### 1.3 Justificación

El sistema de producción de café en Colombia se basa únicamente en el cultivo de variedades de café arábica (Flórez et al., 2021). Aproximadamente 840.000 hectáreas están destinadas al cultivo de café en todo el territorio de Colombia (FNC, 2022) y de estas, 51.190 hectáreas de café existen en el Valle del Cauca cultivadas por cerca de 22.562 caficultores en 24.905 fincas establecidas (Federación Nacional de Cafeteros, 2023).

Esta superficie de cultivo de Arábica se ha venido reduciendo (FNC, 2022) debido a diversos factores como son la diversificación hacia otros cultivos para ampliar las posibilidades de generar ingresos (Muñoz-Rios et al., 2020). Las fluctuaciones en la productividad y la inestabilidad en la producción a lo largo de los años han tenido un efecto significativo en la rentabilidad de la industria cafetalera (Perez et al., 2017) y el desplazamiento de la zona óptima para el cultivo de café arábica debido al crecimiento de los daños causados por la broca del café (CBB) en regiones que se encuentran por debajo de los 1.300 msnm.

El café robusta (*Coffea canephora*) representa el 36% de la producción mundial de café y tiene una relevancia estratégica como una bebida producida por miles de pequeños productores en todo el mundo (Campuzano-Duque et al., 2021), el cual, Brasil y Vietnam representan más de la mitad de la producción mundial de café Robusta. En los últimos años, Brasil, Guatemala, Ecuador, Perú, Vietnam y varias otras naciones han experimentado un incremento en sus exportaciones de café arábica o robusta a Colombia, con el fin de suplir la creciente demanda interna de café tostado y soluble en el país (DANE, 2022), por lo que el cultivo de Café Robusta en Colombia puede contribuir a esta demanda de café sin tener que recurrir al aumento de las importaciones.

Adicionalmente, el café Robusta podría considerarse como una alternativa viable para regiones que antes se dedicaban al cultivo de arábica, pero que han experimentado cambios en las condiciones climáticas en su sistema de producción (Villegas et al., 2023a) y de áreas que experimentarán cambios en el futuro, que obligará a reubicar las plantaciones de café Arábica a zonas que sean más apropiadas desde el punto de vista climático para su cultivo, especialmente hacia regiones más frescas y a altitudes más elevadas (Constantino et al., 2021) (Ahmed et al., 2021).

En este estudio se plantea realizar la identificación de zonas potenciales para la siembra de café Robusta según sus requerimientos de clima, topografía y tipo de suelo necesario para su cultivo en el Valle del Cauca a partir de un análisis multicriterio de elementos (Saaty, 1987), descartando áreas de protección y conservación reglamentadas en el SINAP y cultivos de caña actuales, siendo esta, la primera zonificación potencial de café Robusta realizada en el departamento del Valle del Cauca y el segundo estudio de este tipo a escala 1:25.000 en Colombia. Esto aporta herramientas que pueden ser de utilidad para respaldar la planificación

y el desarrollo de áreas de cultivo de café en la región así como la toma de decisiones en la industria cafetera (González González & Hernández Santana, 2016).

---

## 2. Antecedentes

Mundialmente, diversos autores han realizado estudios de zonificación potencial tanto de café tipo Robusta, como de otros tipos, de los cuales se destacan los siguientes estudios:

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2014), realiza un perfil para la planta de café robusta, realizando una descripción de su taxonomía, usos, ecología, ciclo de crecimiento e información respecto a su origen y zonas potenciales de crecimiento, siendo una guía para los factores en la zonificación potencial del café robusta.

Silva et al., 2020, realizó, la caracterización agroecológica de café Robusta basada en el desarrollo del café robusta en la provincia de Uíge, Angola. Se analizaron los registros de las variables climáticas de lluvia y temperatura, se aplicó el método histórico-lógico para recuperar la información sobre los requerimientos del cultivo y compararlos con las condiciones edafoclimáticas de la provincia, se generaron mapas de idoneidad para temperaturas y precipitaciones a partir del uso de SIG. Este estudio dio como resultado el reconocimiento de que la mayor parte del área de la provincia de Uíge tiene condiciones climáticas para el desarrollo del café robusta y concluye que el conocimiento sobre la compatibilidad entre el comportamiento del clima en la provincia de Uíge y los requisitos del café Robusta como parte de los resultados de la caracterización agroclimática permite la adopción de alternativas para minimizar los factores limitantes del clima en la producción de esta especie.

Igualmente en Angola, Ngolo et al., 2018, realizó la zonificación agroclimática para el cultivo de café en el territorio, evaluando datos o estimaciones de temperatura anual, tasas de precipitación efectiva y total, balance hídrico climático y déficit hídrico anual para los 163 municipios de Angola, donde se concluyó que las áreas consideradas marginales e inadecuadas para el cultivo de café en Angola están relacionadas con condiciones de déficit hídrico, principalmente en la región suroeste y a lo largo de la franja costera, estos resultados obtenidos del balance hídrico climático muestran que la mayor parte del territorio angoleño es marginal o inadecuado para el cultivo de café.

En la isla de Martinica, reconocida por su café en el siglo XVIII, pero que actualmente no tiene industria cafetera, (Claude, 2017) implementó un Sistema de Información Geográfica (SIG) con el objetivo de llevar a cabo una zonificación pedoclimática y determinar los ambientes propicios para las especies del género *Coffea* como parte de un proyecto para revivir esta actividad, donde sus resultados concuerdan con las descripciones que se encuentran en la literatura científica a nivel mundial, que enfatizan los requisitos particulares de temperatura y precipitación para diversas especies de café, donde el *Coffea canephora* y *Coffea liberica* son más adaptables a una gama más amplia de temperaturas y altitudes.

(Fachruddin et al., 2021), en su estudio tuvo como objetivo analizar la idoneidad del terreno para el cultivo de café arábica y robusta en los matorrales del Regencia de Aceh Besar, donde al hacer uso de datos secundarios y datos primarios con el análisis de datos climáticos, determinación de unidades de mapa de tierras y la toma de muestras de suelo en el campo, obtuvo como resultado que la idoneidad de los matorrales para el cultivo de café en el Regencia de Aceh Besar era más adecuada para el cultivo de café robusta.

En Brasil se realizó la zonificación agroclimática para el café Conilón en el estado del Espírito Santo por (Taques y Dadalto, 2019) basada en un análisis detallado de datos climáticos históricos y modelos predictivos de alta precisión, con una resolución espacial más precisa, desarrollados a partir de estadísticas multivariadas de probabilidad y técnicas geoestadísticas avanzadas, usados para identificar las categorías de idoneidad para el cultivo de café Conilón en la región. Esta zonificación resultó ser una herramienta crucial que respalda la planificación y el desarrollo de la actividad cafetera, pues ayuda a identificar las áreas más adecuadas para el cultivo, lo que permite maximizar la eficiencia económica sin comprometer el medio ambiente.

(Cariño et al., 2023), destaca que en el estado de Nayarit en México se realizó la zonificación agroclimática en todo el estado para determinar el tipo de cultivos más convenientes y obtener los mayores rendimientos. Para tal fin se utilizaron características hídricas y térmicas relacionadas con la distribución geográfica de los cultivos, así como índices derivados de datos meteorológicos. Se obtuvo una serie de recomendaciones sobre el manejo para mejorar los rendimientos: tipo de cultivo, época de siembra, riego, fertilización y aplicación de otros agroquímicos; y para evitar daños en los cultivos. Se generó un mapa de zonificación agroclimática utilizando el método de interpolación ponderada por la distancia inversa. Este estudio puede contribuir a la planificación exitosa de los cultivos en toda la región y es un referente para la zonificación agroclimática para cualquier clase de cultivo en general

También en México se realizó el estudio de la zonificación agroecológica del *Coffea arabica* en el municipio Atoyac de Álvarez, México realizado por (González González y Hernández Santana, 2016) en el cual, el enfoque utilizado empleó el procesamiento automático de datos para identificar áreas con diferentes niveles de potencial para el cultivo de café, donde se determinó que las áreas con un alto potencial se encuentran en las zonas de montañas bajas, a altitudes que oscilan entre 1,100 y 1,500 msnm, con pendientes suaves a moderadas que varían entre 1.1° y 18°. Estas se caracterizan por recibir precipitaciones anuales que van desde 1,500 hasta 2,000 mm y presentan un clima semicálido, con temperaturas que se sitúan entre 18°C y 22°C. Además, en estas áreas predominan los suelos del tipo Acrisoles, específicamente de la unidad jerarquizada Ah+Bh+Hh/2. Destacan de este enfoque y metodología la flexibilidad que presenta, pues es necesaria para

---

adaptarse a diversos contextos geográficos y escalas cartográficas. Esto conforma una herramienta valiosa que puede utilizarse para respaldar la planificación y el desarrollo de áreas de cultivo de café en diferentes regiones.

Otro estudio en México, específicamente en el estado de Tabasco desarrollado por (Aceves Navarro et al., 2018), se realizó una investigación con el propósito de identificar las zonas óptimas para el cultivo de café robusta y evaluar cómo este cultivo podría verse afectado en términos de adaptación y rendimiento debido a los cambios climáticos proyectados para mediados del siglo XXI. Este estudio empleó la metodología de Zonificación Agro-Ecológica (ZAE) desarrollada por la FAO para analizar las condiciones actuales y futuras, al considerar escenarios de cambio climático y calcular los posibles rendimientos en áreas identificadas como altamente propicias para el cultivo de café robusta.

En la región amazónica en Perú, (Salas López *et al.*, 2020) Llevaron a cabo una evaluación de la idoneidad del suelo para el cultivo de café (*Coffea arabica*) en la región de Amazonas, con el objetivo de respaldar el desarrollo de la agricultura sostenible. En esta evaluación se estableció una estructura jerárquica que se basó en seis subcriterios climatológicos, cinco subcriterios edafológicos, tres subcriterios fisio-gráficos, cuatro subcriterios socioeconómicos y tres restricciones relacionadas con enfermedades y plagas que afectan al café. Estos datos se integraron mediante el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) y se utilizaron Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Sensores Remotos (RS) como herramientas para llevar a cabo la evaluación.

En Brasil, (Carvalho Alves et al., 2013), utilizaron sistemas de información geográfica y estadísticas para caracterizar la vulnerabilidad climática de los agroecosistemas de café utilizando variables como la temperatura media anual, la temperatura media del mes más frío y el índice de humedad. Esto para caracterizar la vulnerabilidad climática de las especies *Coffea arabica* y *Coffea canephora* basada en superficies climáticas interpoladas.

Igualmente, (Filete *et al.*, 2022), caracterizó el terroir en diferentes áreas de producción de café Robusta, con la aplicación de diferentes métodos de fermentación y observó sus posibles ganancias y pérdidas en la calidad sensorial del café en seis municipios del estado de Espírito Santo. Estos municipios tienen una variación de altitud de 376 m a 866 m. El estudio mostró que las características locales de altitud y temperatura influyen directamente en la calidad sensorial, además demostró que la fermentación natural en una zona de altitud específica entregó buenos resultados, fijando el factor de terroir. Finalmente, se demostró que la fermentación inducida ayuda a mejorar la calidad sensorial en áreas de mayor altitud, lo que indica la posibilidad de reformular el terroir de la producción de Robusta.

Respecto a otro estudio en el estado de Espírito Santo referente a la zonificación Agroclimática para el cultivo de *Coffea canephora*, (Eugenio et al.,

2014) propone el establecimiento de estos cultivos empleando la reclasificación espacial en categorías porcentuales. Las etapas metodológicas utilizadas para evaluar la zonificación agroclimática para el cultivo de *Coffea canephora* incluyeron: creación de una base de datos y análisis de regresión lineal múltiple; interpolación espacial mediante kriging esférico; reclasificación y zonificación agroclimática; vectorización espacial de la zonificación; y cuantificación de la zonificación agroclimática para los 78 municipios del estado. Los resultados indicaron que el estado de Espírito Santo presenta áreas con diversas aptitudes para el cultivo del café conilon, demostrando que la metodología de reclasificación espacial en porcentajes es eficaz.

(Melo Júnior et al., 2001), mediante herramientas de análisis espacial, este investigó la evolución del cultivo de café en el espacio geográfico de una importante región del estado de Minas Gerais, evaluando la sostenibilidad de su producción en diversas zonas climáticas. En este contexto, se realizó una regionalización del café (*Coffea arabica* L.) para la zona del Triángulo Mineiro/Alto Paranaíba, MG, comparándola con los resultados de un modelo económico que descompone la variación de la superficie en efectos de escala y sustitución, considerando el periodo de 1985 a 1995/96. Se observó una tendencia de expansión del café desde el noroeste hacia el noreste, siguiendo las áreas identificadas como aptas en la regionalización. Además, se encontró que la baja representatividad del café en Ituiutaba y Frutal se debe principalmente a factores climáticos, mientras que en Araxá predominan aspectos del suelo. Uberaba, a pesar de ser una zona apta, presenta un rendimiento bajo en la producción de café.

En el estado de Paraná en Brasil, (Andrade et al., 2012), realizó la zonificación agroclimática del café Robusta, donde se verificó los cambios causados por el aumento de temperatura relacionado con el calentamiento global, según las predicciones para los próximos 100 años reportadas por el IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático). Se presentó como alternativa la introducción del café robusta, adaptado a áreas con temperaturas medias anuales entre 22 y 26 °C. Se consideró como aptas para el cultivo las áreas que cumplieran condiciones como riesgo de heladas anuales inferior al 25% de probabilidad, temperatura media anual entre 22 y 26 °C, y deficiencia hídrica anual por debajo de 150 mm. La zonificación para el clima actual indicó que partes de las regiones noroccidental y occidental de Paraná son adecuadas para el cultivo.

(Lima *et al.*, 2014), analizaron la variabilidad espacial y temporal de la productividad del café Robusta en tres años agrícolas consecutivos en la municipalidad de Cachoeiro utilizando técnicas de geoprocésamiento. Se construyó una cuadrícula de muestreo, que demostró una disminución creciente entre las diferentes cosechas. Se concluyó que el análisis cuantitativo utilizando mapas permite observar que los niveles de productividad muestran regiones alternas de pérdida y ganancia entre las diferentes cosechas. El uso de la metodología del álgebra de mapas, que considera la distribución espacial y

---

temporal en el área estudiada, permitió la determinación de índices de reducción de productividad entre las diferentes cosechas.

Adicionalmente, en la provincia de Río de Janeiro, el estudio de (Lima, E. de P. et al., 2022) identificó las áreas climáticamente adecuadas e inadecuadas para el cultivo de café Arábica y Robusta en las siguientes etapas: creación de una base de datos climáticos del estado y cálculo de los componentes del Balance Hídrico Climático, definición de las necesidades agroclimáticas del cultivo, estudio de las condiciones climáticas y adaptabilidad resultante de las especies de café Arábica y Robusta a las condiciones regionales, la síntesis cartográfica de todas las etapas anteriores, utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG) y la identificación de los municipios aptos e inaptos para el cultivo económico del café Arábica y Robusta. Esta zonificación identificó que 30 municipios fueron considerados climáticamente aptos para el cultivo del café Arábica, mientras que para el café Robusta se consideraron aptos 42 municipios.

Referente a estudios sobre el café Robusta en Colombia, (Campuzano-Duque *et al*, 2021), realizan una revisión que abordó tanto los beneficios como las limitaciones que el café Robusta podría presentar en las regiones de producción de Colombia, destacando que la adaptación ecológica de esta variedad de café lo hace especialmente adecuado para resistir la sequía, al poseer una resistencia natural a algunas de las principales plagas y enfermedades que afectan al café arábica. Esto le permite prosperar en condiciones de sequía o temperaturas más elevadas. Los autores afirman que con la perspectiva del cambio climático, probablemente resultarán más brotes de enfermedades y la propagación de insectos, lo que perfila el café Robusta como un nuevo cultivo prometedor para la producción en Colombia, ya que, esta variedad de café muestra la capacidad de adaptarse en zonas de tierras bajas que previamente no se consideraban propicias para el cultivo de café, además de representar un elemento valioso en sistemas de producción agroecológica.

(Collazos-Alarcón *et al*. 2020), realizaron el estudio respecto a la viabilidad económica para la producción y comercialización de café Robusta en Colombia, específicamente en el municipio de Sabana De Torres en el departamento de Santander, del cual concluyen que Colombia cuenta con condiciones propicias para la producción de café robusta, lo que le brinda ventajas competitivas en términos de costos y condiciones climáticas. El estudio muestra que el precio del café Robusta en los mercados internacionales es considerablemente más bajo que el del café arábica, dado que el café robusta se utiliza en mezclas, esto genera una ventaja competitiva para el café colombiano. Los autores concluyen que para lograr una reducción significativa de las importaciones de café robusta a medio plazo, es esencial que tanto las políticas gubernamentales como las iniciativas privadas en el sector agropecuario fomenten la investigación y el desarrollo para impulsar la producción de esta variedad en diversas regiones del país.

(Campuzano-Duque et al., 2021), analizaron tanto los beneficios como las limitaciones asociados al cultivo de café Robusta en las regiones productoras de Colombia, donde mostraron que la adaptación ecológica de esta variedad de café la hace especialmente adecuada para resistir la sequía y posee una resistencia natural a algunas de las principales plagas y enfermedades que afectan al café arábica, permitiéndole prosperar en condiciones adversas o temperaturas más elevadas. Esto tiene especial importancia porque el cambio climático probablemente provoque un aumento en las epidemias de enfermedades y la propagación de insectos. Los autores concluyen que el café Robusta emerge como un nuevo cultivo con un potencial prometedor para la producción en Colombia, pues puede cultivarse a lo largo de las costas del Caribe y el Pacífico o en la región de tierras bajas orientales de Orinoquía y la Altillanura, pero no consideran áreas que tienen cultivos como el Valle del Cauca y no se muestra el área potencial en cada región.

De la misma manera, (Campuzano-Duque y Blair, 2022), en su estudio sobre estrategias para la mejora de café Robusta como un nuevo cultivo en Colombia, concluyen que es muy probable que el cambio climático aumente la demanda de café Robusta como una opción resistente al calor para complementar la producción de café arábica, que se prevé que disminuirá en los Andes, un fenómeno ampliamente documentado a nivel global. En este proceso, es crucial elegir variedades de café Robusta que cumplan con las expectativas y necesidades de los consumidores, procesadores y mercados que ya están bien establecidos en el contexto del café colombiano. La introducción de nuevos productos, como cafés instantáneos, cápsulas de dosis única, mezclas gourmet, dulces y postres, así como bebidas energéticas, contribuirá a promover el uso de cafés Robusta, incluso en un país tradicionalmente productor de café arábica como Colombia.

(González-Orozco *et al.*, 2024), en su estudio proponen identificar las áreas en Colombia con mayor potencial biofísico y socioeconómico para el cultivo de café robusta, donde utilizan un enfoque que combina la adecuación climática y el modelado de rendimientos de cultivos para escenarios climáticos actuales y futuros. Sumado a restricciones del suelo, evaluación de riesgos de plagas y restricciones socioeconómicas, al identificar las regiones con mayor potencial de productividad, menores riesgos de plagas y menor vulnerabilidad al cambio climático. Los autores identificaron áreas con buen acceso al mercado y bajos riesgos de seguridad, sin expandir la frontera agrícola.

Estudios similares respecto a condiciones agroecológicas como el de (Ocampo López *et al.*, 2017) en el que se caracteriza regiones agroecológicamente delimitadas teniendo en cuenta el análisis espacial de factores geográficos y climáticos que influyen en la producción de café en los departamentos de Caldas, Quindío y Risaralda. El estudio concluye que estos factores desempeñan un papel fundamental en la productividad de la caficultura y, por lo tanto, proporcionan orientación para la planificación y gestión del territorio.

---

Respecto a zonificaciones del café Robusta en Colombia a escalas detalladas y en áreas consideradas no convencionales para café se ha hecho un único trabajo, donde (Villegas *et al.*, 2023), realizaron la caracterización agroecológica en la zona centro – sur del departamento de Caldas, donde emplearon los parámetros de la FAO como son las condiciones climáticas, topografía, temperatura, precipitación, radiación solar y condiciones de suelos para determinar las zonas apropiadas para el cultivo de café Robusta.

En la literatura sobre el café Robusta en Colombia se encuentran otros estudios como el de (Salles *et al.*, 2021), el cual evaluó las características nutricionales de 27 genotipos de *C. canephora*, sometiénolas a dos esquemas de gestión del agua en el suelo para encontrar evidencias de un mayor contenido de nutrientes en las hojas, exportaciones y potencial de reciclaje de nutrientes en las ramas productivas de varios genotipos. Por otra parte, ((Busato *et al.*, 2022), evaluó las características de crecimiento y rendimiento del café Robusta irrigado en respuesta a diferentes niveles de nitrógeno, lo que resultó en la determinación de los niveles mínimos de N requeridos para alcanzar el rendimiento máximo, denominados niveles críticos.

Respecto a condiciones climáticas, autores como (Lambot *et al.*, 2017), han realizado estudios respecto a la influencia de las condiciones climáticas y edáficas en las que se cultivan las plantas de café y su interacción con la calidad del café. También (Arias *et al.*, 2021), evaluó la habilidad de los modelos de la quinta y sexta fase del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP) para representar el ciclo anual de precipitación y temperatura superficial del aire en Colombia. Los modelos de última generación (CMIP6) mejoran su desempeño con respecto a los modelos de la generación anterior (CMIP5), aunque siguen presentando sesgos sistemáticos como dificultades para representar la Zona de Convergencia Intertropical y procesos que dependen de la elevación, fundamentales para el comportamiento intra-anual de la precipitación y la temperatura en Colombia.

En la misma área problemática, (González *et al.*, 2011), realizaron un estudio de zonificación agroecológica de caña de azúcar para el Valle del río Cauca teniendo en cuenta factores como balance hídrico, el estudio semidetallado de suelos del valle del río Cauca, agrupación de suelos y grupos de humedad a partir de Sistemas de Información Geográfica y métodos estadísticos y geoestadísticos.

## **3. Objetivos**

### **3.1 Objetivo general**

Desarrollar la zonificación potencial para la siembra de café Robusta en el departamento del Valle del Cauca.

### **3.2 Objetivos específicos**

- Desarrollar la metodología de zonificación potencial a escala 1:25.000.
- Identificar las áreas potenciales para la siembra de café Robusta.
- Validar las áreas identificadas a partir de la metodología.

---

## 4. Referente Contextual

El Valle del Cauca es un departamento localizado en la cuenca del río Cauca, limita con los departamentos de Chocó, Risaralda, Quindío, Tolima y Cauca y al occidente limitando con el océano pacífico. Comprende 42 municipios, ubicados entre las cordilleras oriental y central y el océano pacífico, que hacen parte de la región pacífica y andina, con una extensión total de 2.067.302 hectáreas. Tienen elevaciones desde los 0 a 4000 msnm, lo que hace tener todos los pisos térmicos y precipitaciones anuales desde los 500 mm en la cuenca del río Cauca a los 13000 mm al año en el pacífico.

El departamento del Valle del Cauca tiene 51.190 hectáreas de café (el 2,4% del departamento), cultivadas por cerca de 22.562 caficultores en 24.905 fincas establecidas (Federación Nacional de Cafeteros, 2023). Adicional a los cultivos de café, el Valle del Cauca al ser una región geográficamente diversa, cuenta con una amplia variedad de cultivos debido a su clima variado y sus diferentes zonas agroecológicas, entre los cuales se destacan los cultivos de caña azucarera, plátano, piña, cítricos, banano, maíz tecnificado, caña panelera, aguacate y uva principalmente; también se destacan cultivos como tomate, papaya, arroz riego, lulo, maracuyá, yuca, borjón, cebolla de rama, guayaba y chontaduro (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2023).

Dentro del departamento diez municipios forman parte de la delimitación del Patrimonio Mundial de Paisaje Cultural cafetero de la UNESCO, debido a sus características excepcionales y su cumplimiento de los atributos que se establecieron para tal reconocimiento, estos son los municipios de Alcalá, Ansermanuevo, Argelia, Caicedonia, El Águila, El Cairo, Ríofrío, Sevilla, Trujillo y Ulloa (PCC, 2022) estos se encuentran ubicados principalmente en los flancos occidental de la cordillera central y del flanco oriental de la cordillera occidental. Adicionalmente, el departamento cuenta actualmente con 642.296 hectáreas en áreas protegidas (el 31% del departamento).

Dentro del rango de los 600 a los 1200 msnm en el área de estudio (ver Figura 2), hay en total 491.382 hectáreas, de las cuales, según la capa de coberturas de la tierra de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, principalmente se encuentran los cultivos de caña de azúcar, que corresponde a 207.606 hectáreas, 120.673 hectáreas a pastos, 7548 hectáreas a maíz y 2994 hectáreas a arroz.

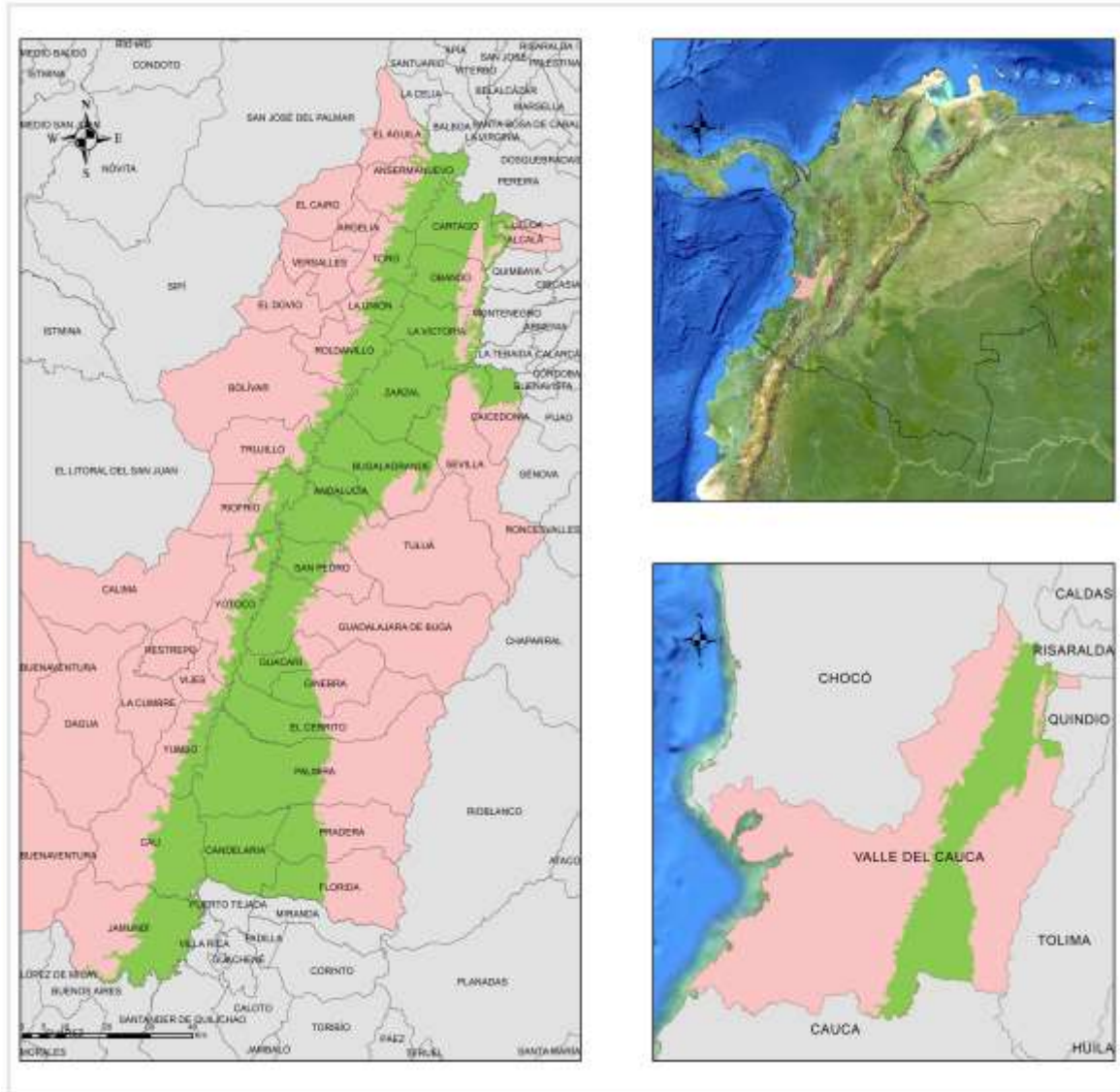


Figura 2. Localización del área de estudio.

---

## 5. Referente teórico

### 5.1 Descripción y características del café Robusta

El café robusta (*Coffea canephora*) es un arbusto que puede alcanzar una altura de 2-9 metros, a menudo con un hábito de crecimiento en forma de sombrilla grande que comienza a dar frutos en 3-4 años, sus bayas son pequeñas y rojas cuando están maduras, sus granos se utilizan en la producción de café instantáneo, es más sensible al frío que el café arábica y puede ser destruido por las heladas, el rendimiento aumenta hasta los 14 años, y la vida económica de la planta es de 20-80 años (promedio de 50 años), con rendimientos decrecientes. Adicionalmente, su ciclo de crecimiento es de 270-300 días y puede tolerar de 21 a 30 días de sequía leve (FAO, 2014).

El café Robusta se origina en África Occidental y las selvas ecuatoriales africanas el cual, puede prosperar a altitudes que oscilan entre los 600 m y 2.400 m- en zonas ecuatoriales y a nivel del mar, dentro del rango de latitud entre 11°N y 13°S, que es su área habitual de crecimiento. Adicional, para lograr una floración uniforme, requiere de uno o dos meses con menos de 50 mm de lluvia la cual, si es intensa durante y después de la cosecha no es beneficiosa (FAO, 2014).

La planta solo florecerá cuando los días tengan 13 horas o menos de luz, también para un crecimiento y desarrollo óptimos, la humedad relativa debe mantenerse entre el 70% y el 90% y los períodos de niebla y nubes bajas son beneficiosos, pero deben ir seguidos de un período más seco de 1-2 meses para que se inicien las yemas florales. Cabe sumar que ni la ausencia total de viento ni los vientos fuertes son ideales, ya que los vientos fuertes, secos, cálidos o fríos, el granizo y las lluvias intensas pueden causar daños. Finalmente, respecto a condiciones del suelo, esta especie puede crecer en suelos poco profundos en áreas de alta precipitación y tolera el encharcamiento temporal.

#### 5.1.1 Beneficios del café Robusta

En comparación con la variedad arábica, el robusta es una especie más fuerte y resistente (FAO, 2014). Diversas investigaciones a nivel regional han puesto de manifiesto la vulnerabilidad del café arábica frente a las condiciones climáticas, además del potencial impacto del cambio climático en varios aspectos cruciales de la producción cafetera. (Läderach et al., 2017) (Ahmed *et al.*, 2021). Con una gestión adecuada, las plantaciones pueden producir hasta 2 toneladas por hectárea de bayas frescas (FAO, 2014).

### **5.1.2 Requisitos ambientales para la siembra de café Robusta**

Según los parámetros de la FAO para el cultivo de café robusta, se requieren de características como temperaturas entre los 20 a 30 grados, precipitaciones entre los 1700 a 3000 mm, pH del suelo entre 5 a 6.3, profundidades de suelo entre los 50 a 15 cm, textura de suelo media a gruesa, fertilidad alta, salinidad baja, suelos bien drenados en climas tropicales húmedos a secos y pendientes del terreno preferiblemente menor a 15%. Se ha proyectado que en condiciones de Colombia puede sembrarse entre 400 y 1300 msnm y hasta 13° de latitud norte, correspondiendo a su rango latitudinal normal, con humedad relativa entre el 70% y el 90% (FAO, 2014).

### **5.1.3 Estudios en Colombia sobre café robusta**

Referente a estudios de café Robusta en Colombia, pocos trabajos en la literatura debido a la novedad del tema, por lo que se cuenta en Colombia con estudios como el de (Campuzano-Duque et al, 2021), que realizan una revisión que abordó tanto los beneficios como las limitaciones que el café Robusta podría presentar en las regiones de producción de Colombia, (Collazos-Alarcón et al. 2020), que realizaron el estudio respecto a la viabilidad económica para la producción y comercialización de café Robusta en Colombia, específicamente en el municipio de Sabana De Torres en el departamento de Santander, (Campuzano-Duque y Blair, 2022), que hablan en su trabajo sobre estrategias para la mejora de café Robusta como un nuevo cultivo en Colombia. En la literatura sobre el café Robusta en Colombia se encuentran otros estudios como el de (Salles et al., 2021), el cual evaluó las características nutricionales de 27 genotipos de *C. canephora*, (Busato et al., 2022), evaluó las características de crecimiento y rendimiento del café Robusta irrigado en respuesta a diferentes niveles de nitrógeno.

Respecto a zonificación potencial de café robusta en Colombia, se encuentran los trabajos de (González-Orozco et al., 2024), que en su estudio proponen identificar las áreas en Colombia con mayor potencial biofísico y socioeconómico para el cultivo de café robusta, donde utilizan un enfoque que combina la adecuación climática y el modelado de rendimientos de cultivos para escenarios climáticos actuales y futuros y respecto a zonificaciones del café Robusta en Colombia a escalas detalladas y en áreas consideradas no convencionales para café se ha hecho un único trabajo, donde (Villegas et al., 2023), realizaron la caracterización agroecológica en la zona centro – sur del departamento de Caldas, donde emplearon los parámetros de la FAO como son las condiciones climáticas, topografía, temperatura, precipitación, radiación solar y condiciones de suelos para determinar las zonas apropiadas para el cultivo de café Robusta.

---

## 5.2 Sistemas de Información Geográfica para la zonificación potencial de café robusta

### 5.2.1 Insumos cartográficos

Según los parámetros de la FAO para el cultivo de Robusta, siguiendo la metodología de (Villegas et al., 2023b) y, partir de la información cartográfica abierta y disponible en geoportales, se plantea la utilización de los siguientes insumos cartográficos para las variables de clima, morfometría, y suelo.

**Radiación solar:** se cuenta información del Global Solar Atlas, publicado por el Grupo del Banco Mundial, financiado por ESMAP, que cuenta con el mapa de radiación solar para todo Colombia. Este utiliza un modelo de radiación solar semiempírico, o sea que los datos de los satélites se utilizan para identificar las propiedades de las nubes utilizan los algoritmos más avanzados. Se consideran la mayoría de los procesos físicos de atenuación atmosférica de la radiación solar y también se utilizan algunos parámetros físicos de entrada. Por tanto, este enfoque es capaz de reproducir situaciones reales (The World Bank, 2017).

**Precipitación humedad relativa y temperatura:** A partir de los datos abiertos de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), se obtuvo información de la precipitación media, humedad relativa y temperatura para la vertiente del Cauca.

La precipitación media fue construida por la CVC a partir de los registros de precipitación total mensual de 100 estaciones de la red hidroclimatológica de la CVC, en el periodo 1984-2016 utilizando el método de interpolación de Kriging (CVC, CIAT, 2018).

La humedad relativa, se basó en los conceptos de Holdridge (1982), donde se calcula la relación de evapotranspiración potencial (ETP) mediante la división del valor de evapotranspiración potencial promedia (ETPP) por el valor de la precipitación promedia anual (PPA). Esta capa se obtuvo a partir de la interpolación de los valores de la red de estaciones de la CVC a partir del modelo de interpolación IDW.

La temperatura del territorio se estableció a partir de las isotermas, las cuales se calculan a partir de modelos digitales a los que se les aplican algunas ecuaciones generadas y ajustadas con la información de las estaciones climáticas, obteniendo valores aproximados.

**Morfometría:** a partir del modelo de elevación digital (DEM) de 12.5 metros de resolución espacial del satélite ALOS (Advance Land Observation Satellite) de la Agencia Japonesa de Exploración aeroespacial – JAXA, se determinarán parámetros como los rangos altitudinales y la pendiente del terreno.

**Suelo:** al utilizar el Mapa Digital de Suelos a escala 1:25.000 y la información referente a muestreos de suelo, se interpolaron cada una de las variables del suelo a analizar como son el pH, el contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, Fósforo, Calcio, Magnesio, Potasio, y porcentaje de arena.

### 5.2.2 Análisis multicriterio de elementos

El análisis multicriterio de elementos es una técnica utilizada en la toma de decisiones para evaluar y comparar alternativas basadas en múltiples criterios o factores (Saaty, 1987). Consiste en identificar los diferentes criterios relevantes para la toma de decisiones y asignarles pesos o importancias relativas según su importancia en el proceso de decisión. Una vez que se han establecido los criterios y sus pesos relativos, se procede a evaluar cada alternativa en relación con cada uno de estos criterios. Esto implica asignar puntajes o calificaciones a cada alternativa en función de su desempeño en cada criterio.

En los sistemas de información geográfica (SIG) el análisis multicriterio de elementos se utiliza para tomar decisiones espaciales basadas en múltiples criterios geográficos. Esta técnica combina la capacidad de los SIG para capturar, almacenar, manipular y analizar datos geoespaciales con la metodología del análisis multicriterio. Una de las ventajas ofrecidas por las metodologías multicriterio es la capacidad de incorporar una amplia gama de factores en el proceso de evaluación. Lo distintivo de estas metodologías radica en su capacidad para convertir mediciones y percepciones diversas en una escala uniforme, lo que facilita la comparación de elementos y la determinación de prioridades (Grajales-Quintero *et al.*, 2013).

## 6. Hipótesis de investigación

El departamento del Valle del Cauca presenta áreas potenciales para la siembra de café Robusta.

## 7. Metodología

### 7.1 Enfoque metodológico

La presente investigación corresponde a un enfoque cuantitativo al ser un problema de estudio medible, concreto y delimitado.

### 7.2 Tipo de estudio

La investigación corresponde a un enfoque cuantitativo de tipo descriptivo, ya que, a partir de datos numéricos de capas temáticas como el clima, topografía y suelo mediante de técnicas de evaluación de análisis multicriterio de elementos, se logra determinar áreas que cumplen rangos a partir de pesos ponderado asignados establecidos.

### 7.3 Diseño de la investigación

Esta investigación adoptó un enfoque experimental al modificar diversas variables independientes (consideradas como variables de peso) con el propósito de evaluar cómo la sumatoria de éstas y determinar la clasificación de áreas para el cultivo de café Robusta (Figura 3).

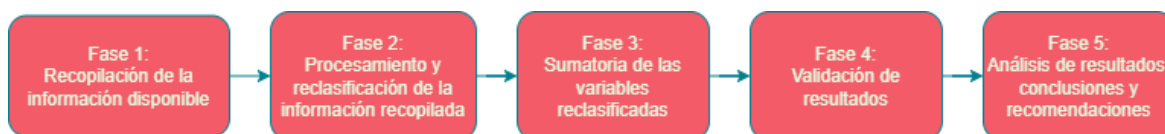


Figura 3. Fases metodológicas de la investigación.

### 7.4 Población o unidad de trabajo

Como población de estudio se tiene zona del valle geográfico del río Cauca en el departamento del Valle del Cauca, la cual comprende 33 municipios, abarcando un área total de 491.382 hectáreas.

## 7.5 Muestra y muestreo

A partir de la información respecto a las coberturas de la tierra del departamento del Valle del Cauca, se verifica el tipo de cobertura presente en el área potencial, al verificar la factibilidad del modelo para futuros cambios en su uso.

## 7.6 Técnicas e instrumentos de recolección de información

A partir de los criterios establecidos por la FAO (Figura 4) para la siembra de café Robusta (FAO, 2014) respecto al clima (Temperatura media, radiación solar, temperatura mínima, temperatura máxima, precipitación anual, y humedad relativa), Topografía (Altitud, pendiente) y el suelo (pH, contenido de materia orgánica, capacidad catiónica, contenido de fósforo, calcio, magnesio y potasio y porcentaje de arena) y a partir de los insumos utilizados para la zonificación potencial de café robusta en el centro – sur de Caldas (Villegas *et al.*, 2023), (Figura 5) se realizó la recopilación de la información geográfica y alfanumérica disponible a escala 1:25.000 de fuentes oficiales como el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), Colombia en mapas, geoportal del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), datos abiertos de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), Alaska Satellite Facility (ASF) y datos de Solar resource data (Solargis).

Adicionalmente se incorporó información de cartografía básica del IGAC como son los drenajes dobles, drenajes sencillos y cuerpos de agua para todo el departamento y las áreas contiguas a este, áreas protegidas del SINAP y áreas urbanizadas y coberturas de bosque extraídas del mapa de coberturas de la tierra de la CVC.

Para la recolección de información se utilizaron datos abiertos de diferentes instituciones a nivel nacional e internacional, dando prioridad a insumos a escala 1:25.000 con cubrimiento total del departamento del Valle del Cauca o parcial en la cuenca del río Cauca en el departamento. Esta información se compiló y se analizó su pertinencia para la incorporación en el modelo.

Descripción							
Forma de vida	Arbusto		Fisiología		Multi tallo, hojas perennes		
Hábito	Erguido		Categoría		Materiales, medicinales y aromáticos		
Vida útil	Perenne		Atributo de la planta		Crecimiento a gran escala		
Ecología							
	Óptima		Absoluta		Óptima	Absoluta	
	Min	Max	Min	Max	Profundidad del suelo	Media (50-150 cm)	Poco profunda (20-50 cm)
Temperatura requerida	20	30	12	36	Textura del suelo	media, gruesa	Gruesa, media, fina
Precipitación anual	1700	3000	900	4000	Fertilidad del suelo	Alta	Baja
Latitud	-	-	11	13	Salinidad del suelo	Baja (<4 dS/m)	Baja (<4 dS/m)
Altitud	-	-	-	1300	Drenaje del suelo	Bueno (períodos secos)	malo (saturado >50% del año), bueno (períodos secos)
pH suelo	5	6.3	4	8	Zona climática	Tropical seco y húmedo	
Intensidad de la luz	Cielo claro	Cielo nublado	Muy brillante	Sombra clara	Temperatura crítica	Durante el descanso	En el crecimiento temprano
Foto-período	Días cortos (<12 horas), días neutrales (12-14 horas)					5	5
Cultivo							
Ciclo de cultivo	Min				Max		
	270				300		
Usos							
Uso principal	Uso detallado				Parte usada		
comida y bebida	Vitaminas, minerales				Semillas		
aditivo alimentario	Condimentos, sazónadores				Semillas		
Medicinal	Aplicaciones, sensoriales, sistema nervioso, sistema digestivo, sistema metabólico, sangre, musculares/esqueléticas y sistema endocrino				Semillas		
Ambiental	mejoradores del suelo, agrosilvicultura				Frutas, planta entera		
Combustibles	Carbón				Frutas		
Materiales	Tinte				Frutas		

Figura 4. Requisitos para la siembra de café Robusta de la FAO. Tomado y modificado de FAO.

Grupo	Variable	Peso (%)	Muy adecuado	Adecuado	Óptimo	Marginalmente adecuado	No apto
Climatología (50%)	Temperatura media	30	> 26.0	24.0 – 26.0	22.0 – 24.0	18.0 – 22.0	< 18.0
	Radiación solar	20	> 400	350 – 400	300 – 350	250 – 300	< 250
	Temperatura mínima	15	>22.0	20.0 – 22.0	18.0 - 20.0	16.0 – 18.0	< 16.0
	Temperatura máxima	15	> 28	26.0 – 28.0	24.0 – 26.0	22.0 – 24.0	< 22.0
	Precipitación	15	>3000	2500 - 3000	2000 - 2500	1500 – 2000	<1500
	Humedad relativa	5	< 70	70.0 – 75.0	75.0 – 80.0	80.0 – 85.0	> 85.0
Topografía (30%)	Altitud	60	< 700	700 – 900	900 – 1100	1100 – 1300	> 1300
	Pendiente	40	< 5.0	5.0 – 10.0	10.0 – 15.0	15.0 – 20.0	> 20
Suelo (20%)	pH	20	> 6.0	5.5 – 6.0	5.0 – 5.5	4.8 – 5.0	< 4.8
	Contenido de materia orgánica	20	> 14	12 – 14	10 – 12	8 – 10	< 8
	Capacidad de intercambio catiónico	15	> 20	15.0 – 20.0	10.0 – 15.0	5.0 – 10.0	< 5.0
	Fósforo	10	> 20	15.0 – 20.0	10.0 – 15.0	5.0 – 10.0	< 5.0
	Calcio	10	> 8.0	6.0 – 8.0	4.0 – 6.0	2.0 – 4.0	< 2.0
	Magnesio	10	> 4.0	3.0 – 4.0	2.0 – 3.0	1.0 – 2.0	< 1.0
	Potasio	10	> 0.6	0.45 – 0.6	0.3 – 0.45	0.15 – 0.3	< 0.15
Arena	5	> 60	45 - 60	30 - 45	15 - 30	< 15	

Figura 5. insumos utilizados para la zonificación potencial de café robusta en el centro – sur de Caldas, tomado de Villegas 2023.

### 7.6.1 Temperatura media

Para el análisis de la temperatura media, a partir de información hidrometeorológica la CVC determinó que sólo 14 estaciones eran idóneas para representar la temperatura máxima y mínima (CVC, CIAT, 2018) y del modelo de elevación digital del terreno, para el cálculo de la temperatura media, (Ocampo López, 2012) propone un modelo de regresión lineal, la cual, aplica en el modelo de zonificación potencial, en donde la temperatura es inversamente proporcional y lineal con respecto a la altitud (Figura 6). Este modelo se calculó a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Temperatura media.

$$\text{Temperatura media } (^{\circ}\text{C}) = 30.319 - 0.0064 (\text{Altura})$$

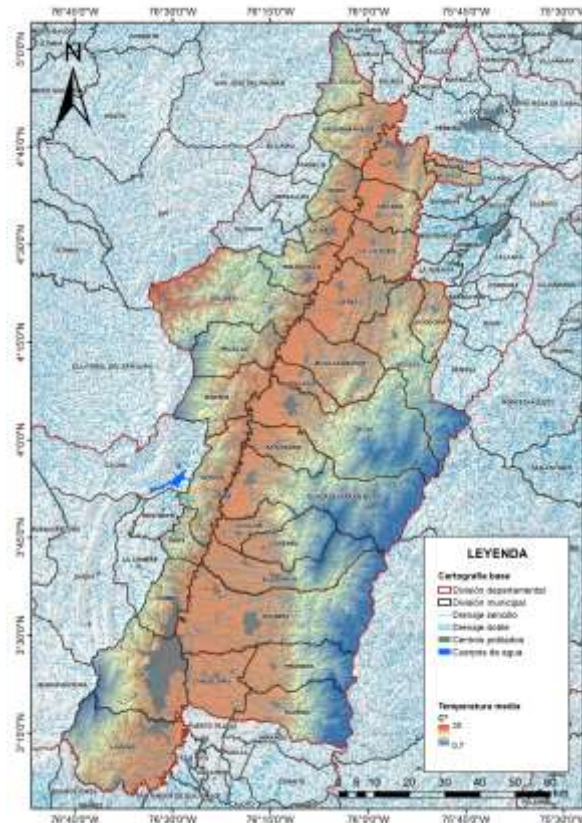


Figura 6. Temperatura media resultado de la Ecuación 1. Temperatura media.

Para los municipios analizados, la temperatura media varía desde los 0.7C° en las regiones de mayor altura hasta los 30C° en las zonas correspondientes al valle del río Cauca.

En Colombia, la variación del gradiente de temperatura es de  $5,53^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , en promedio; sin embargo, no es homogénea en el territorio; en la región Andina es  $6,13^{\circ}\text{C}/\text{km}$  (Ocampo López, 2012).

### 7.6.2 Radiación solar

Respecto a la información de radiación solar, se utilizó la información correspondiente al Atlas Solar Global, el cual es publicado por el Grupo del Banco Mundial, financiado por ESMAP, y preparado por Solargis. Para estos modelos de irradiancia solar, se utilizaron datos satelitales y atmosféricos, controlados y validados sistemáticamente, e integrados y adaptados regionalmente para funcionar de manera confiable en diversas condiciones geográficas (The World Bank, 2017). Basados en fundamentos teóricos sólidos, estos modelos ofrecen resultados consistentes y estables computacionalmente, superando en precisión a los enfoques antiguos debido a su mayor elaboración y a las diferencias en su implementación. (The World Bank, 2017). (Figura 7).

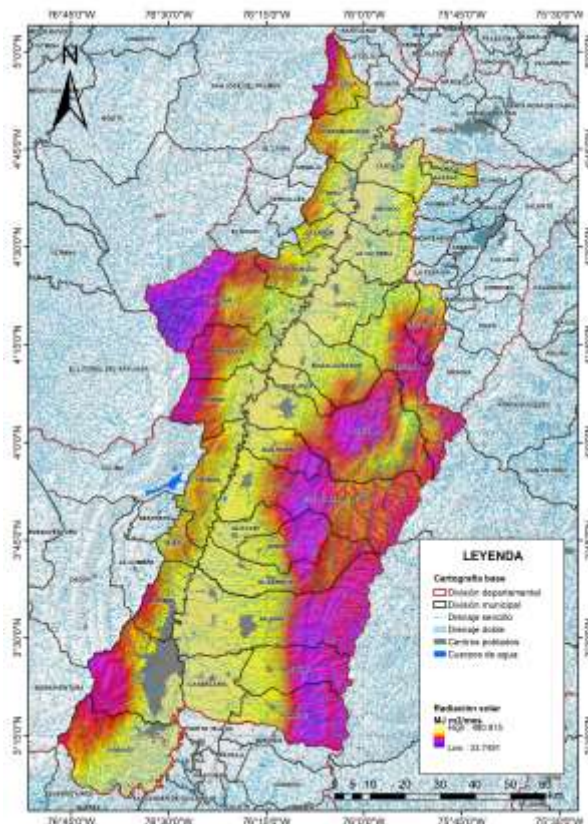


Figura 7. Radiación solar

Para los municipios de análisis, se presentan niveles de radiación promedio de 480 a  $33.6 \text{ MJ m}^2/\text{mes}$ , siendo el área del valle del Río Cauca el área con

mayores valores de radiación solar, y las zonas montañosas en la cordillera central y occidental con los menores valores.

### 7.6.3 Temperatura mínima

Para el análisis de la temperatura mínima, al igual que la temperatura media, a partir de información hidrometeorológica recopilada por la CVC y del modelo de elevación digital del terreno, (Ocampo López, 2012) propone un modelo de regresión lineal la cual, aplica al modelo de zonificación potencial, en el cual, la temperatura es inversamente proporcional y lineal con respecto a la altitud (Figura 8).

Este modelo se calculó a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 2. Temperatura mínima.

$$\text{Temperatura mínima (}^{\circ}\text{C)} = 24.452 - 0.0058(\text{Altura})$$

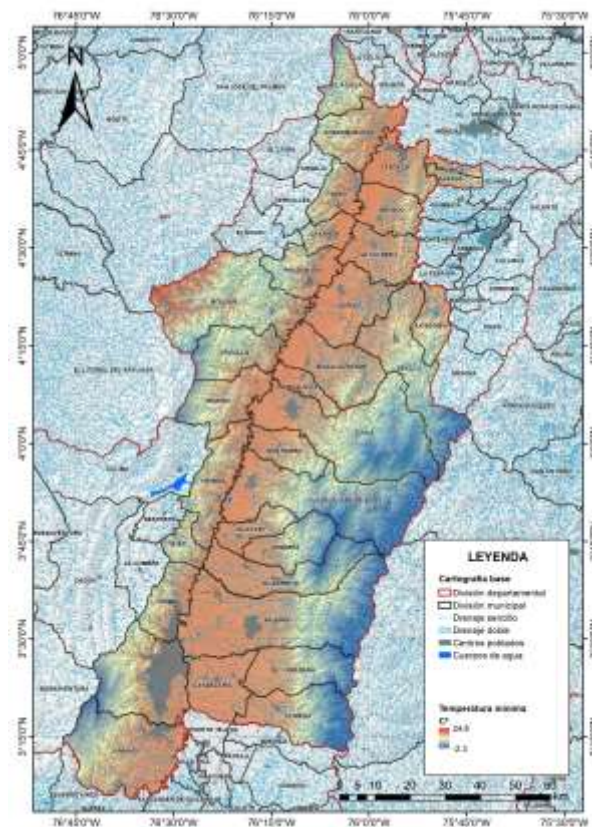


Figura 8. Temperatura mínima resultado de la Ecuación 2. Temperatura mínima.

Para los municipios analizados, la temperatura mínima varía desde los  $-2.3^{\circ}\text{C}$  en las regiones de mayor altura hasta los  $24.8^{\circ}\text{C}$  en las zonas correspondientes al valle del río Cauca.

## 7.6.4 Temperatura máxima

Para el análisis de la temperatura máxima, al igual que la temperatura media y la temperatura mínima, a partir de información hidrometeorológica recopilada por la CVC y del modelo de elevación digital del terreno, (Ocampo López, 2012) propone un modelo de regresión lineal a partir de la siguiente fórmula, la cual, se aplica al modelo de zonificación potencial, en el cual, la temperatura es inversamente proporcional y lineal con respecto a la altitud. (Figura 9). Este modelo se calculó a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 3. Temperatura máxima

$$\text{Temperatura máxima } (^{\circ}\text{C}) = 34.498 - 0.0056(\text{Altura})$$

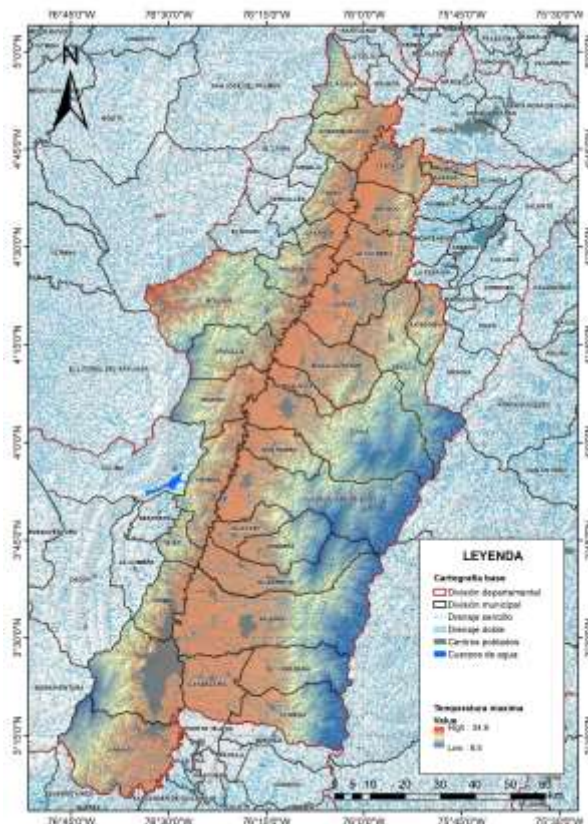


Figura 9. Temperatura máxima resultado de la Ecuación 3. Temperatura máxima

Para los municipios analizados, la temperatura mínima varía desde los 8.5°C en las regiones de mayor altura hasta los 34.9°C en las zonas correspondientes al valle del río Cauca.

### 7.6.5 Precipitación media anual

Para la precipitación media anual se utilizó la capa de precipitación media anual de la cuenca del Río Cauca, generada a partir del Plan Integral de Cambio Climático para el Valle del Cauca (PICC), el cual se seleccionaron 122 estaciones de precipitación que contaban con un amplio registro histórico (1981-2015), menor porcentaje de datos faltantes y menor presencia de datos atípicos del estudio (CVC, CIAT, 2018).

(CVC, CIAT, 2018) destacan una variabilidad espacial en la precipitación entre el pacífico vallecaucano y el valle del río Cauca, puesto que hacia el pacífico la precipitación acumulada mensual puede llegar a superar los 9000 mm al año, mientras que en el valle del río Cauca estos valores oscilan entre 800 y 3000 mm al año (Figura 10).

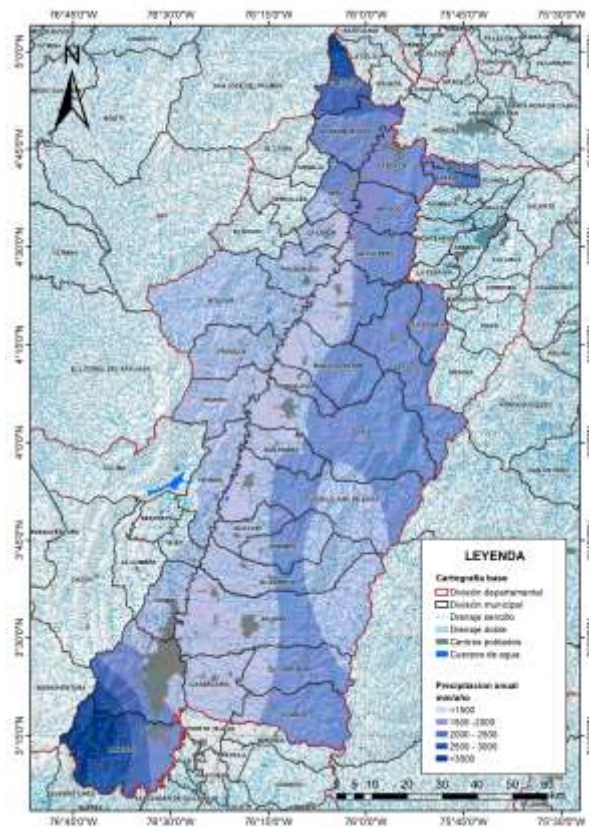


Figura 10. Precipitación media anual.

Para los municipios de análisis, se tienen precipitaciones anuales desde los 1500 mm a más de 3000 mm, siendo los municipios de Jamundí y El Águila, los municipios que presentan mayores precipitaciones anuales. La mayoría de municipios, se caracterizan por precipitaciones predominantemente menores 1500 mm al año

### 7.6.6 Humedad relativa

Para el cálculo de la humedad relativa, se utilizaron los valores promedio anuales arrojados por 24 estaciones hidrometeorológicas de la CVC y del IDEAM, los cuales, se interpolaron a partir del método IDW (Achilleos, 2011). (Figura 11).

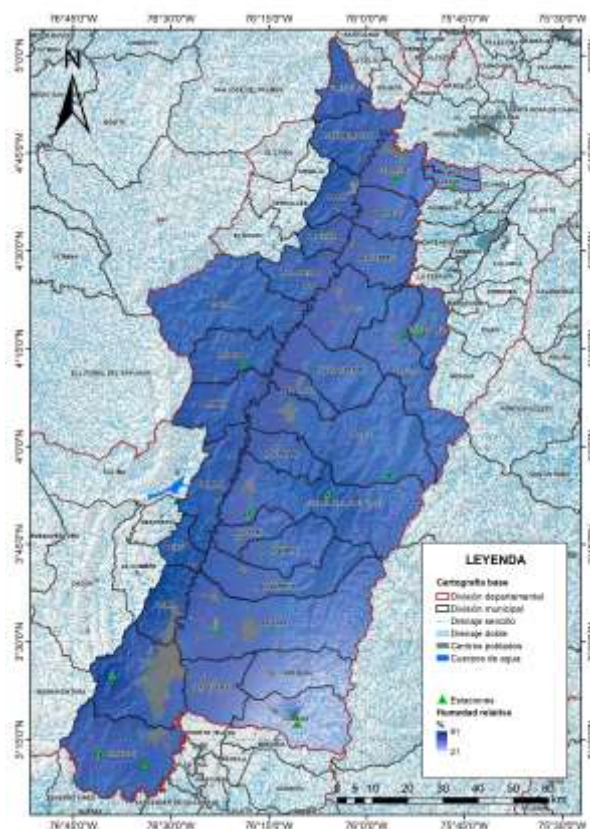
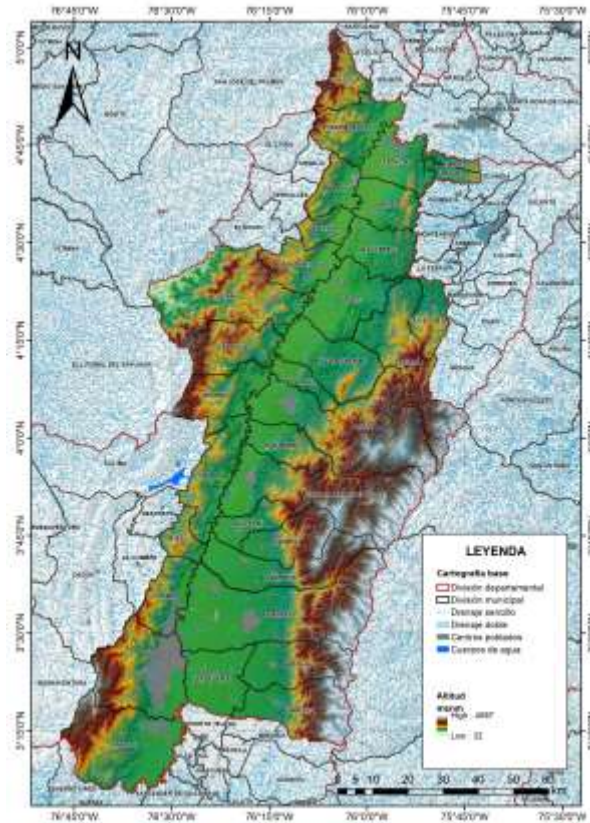


Figura 11. Humedad relativa.

Respecto a los valores de humedad relativa, se presentan valores desde el 21% de humedad hasta el 91% de humedad. La gran mayoría de municipios presentan valores de humedad alta, menos por los municipios de Florida y Pradera, los cuales presentan los menores porcentajes de humedad relativa.

### 7.6.7 Altitud

Para determinar la altitud, se utilizó información recopilada del sensor ALOS PALSAR, el cual posee información disponible de modelos de elevación digital a 12.5m de resolución espacial y resolución radiométrica de 16 bits (Figura 12).



*Figura 12.* Altitud.

Para los municipios de estudio, se tienen alturas desde los 4587 msnm a los 32 msnm, pero restringido dentro del rango de los 600 a los 1200 msnm para el área de estudio. Las mayores alturas están presentes en los municipios localizados en la cordillera central, los cuales son los municipios de Florida, Pradera, Palmira, El Cerrito, Ginebra, Guadalajara de Buga, Tuluá, y Sevilla, respectivamente.

### 7.6.8 Pendiente

Para determinar las pendientes del terreno, se utilizó información recopilada del sensor ALOS PALSAR, el cual posee información disponible de modelos de elevación digital a 12.5m de resolución espacial y resolución radiométrica de 16 bits. (Figura 13). Esta información se transformó a partir de software SIG en la inclinación del terreno en porcentaje (Polidori & El Hage, 2020).

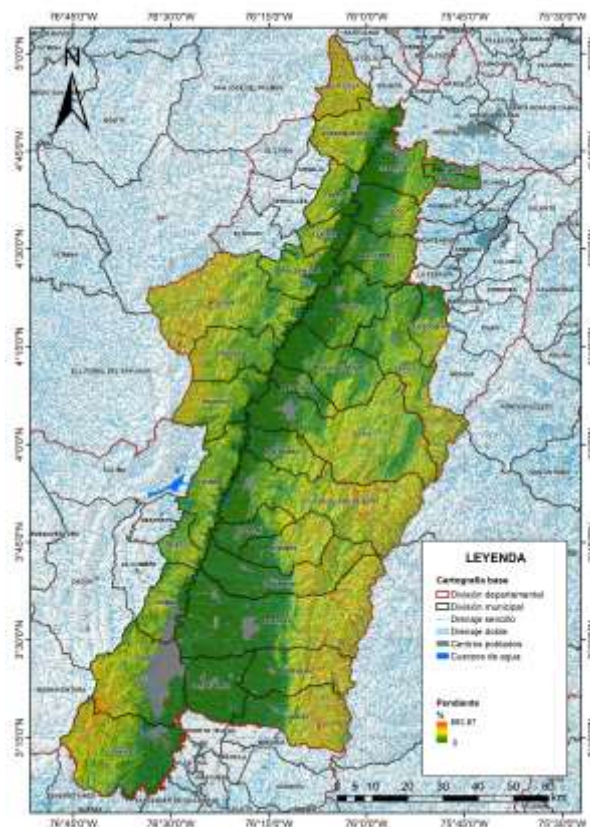


Figura 13. Pendientes del terreno

Para los municipios de análisis, existen pendientes totalmente planas (0% o 0°) hasta pendientes totalmente escarpadas (893% o 83.5°). Las áreas con mayores valores promedios de inclinación, se presentan en las zonas alta de cordillera.

### 7.6.9 Suelo

A partir del levantamiento semidetallado de suelos escala 1:25.000 de las cuencas priorizadas por la corporación autónoma regional del Valle del Cauca – CVC, se analizaron en total 655 perfiles para la caracterización de propiedades del suelo como son el pH, contenido de materia orgánica, Fósforo, Calcio, Magnesio, potasio y la capacidad de intercambio catiónico. (Figura 14).

Para esto, se hizo un filtrado de la información, depurando datos de perfiles donde la información no esté disponible.

Los resultados de esta depuración, se interpolaron mediante el método de interpolación Kriging para determinar los valores promedio de zonas sin información.

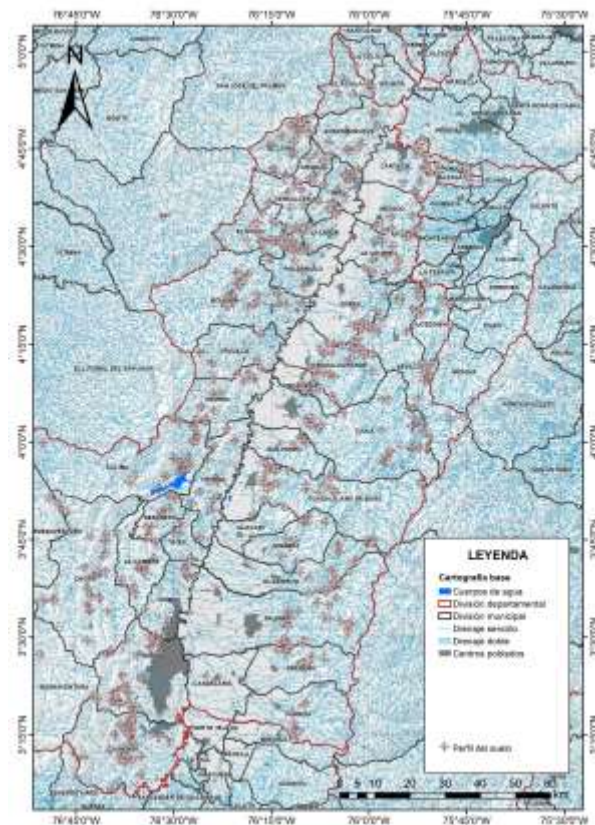


Figura 14. Localización de muestreos del suelo.

---

## 7.7 Plan de análisis

A partir del Software SIG Arcgis, se realizó el análisis multicriterio de elementos, asignando un calificativo numérico a cada uno de los parámetros de las capas geográficas, y a partir del álgebra de mapas, sumando las capas geográficas resultantes, dando como resultado el índice de potencialidad al cultivo de café robusta en el Valle del Cauca.

### 7.7.1 Procesamiento y reclasificación de la información recopilada

Con la información recopilada y seleccionada para el análisis, se ajustó la información al límite de estudio mediante software SIG, generando los insumos a un mismo límite cartográfico.

Posteriormente, cada variable seleccionada se reclasifica en cinco rangos de calificación (Saaty, 1987) en cinco clases que son: 5/ Muy adecuado (describe condiciones muy adecuadas para el desarrollo del cultivo), 4/ Adecuado (tiene condiciones adecuadas para el cultivo y sin restricciones), 3/ Óptimo (tiene condiciones adecuadas para el cultivo), 2/ Marginalmente adecuado (condiciones con algunas restricciones que se pueden manejar con agronomía) y 1/ No apto (área con restricciones de clima y suelo), asignados según los rangos establecidos para la zonificación potencial de café Robusta (Villegas *et al.*, 2023a) (FAO, 2014).

Para la información en formato raster se reclasificó la información y se convirtió a formato vectorial, para realizar la sumatoria y definir áreas totales de cada unidad cartográfica.

### 7.7.2 Temperatura media

La calificación más alta respecto a valores de temperatura media, correspondió al valle del Río Cauca, con valores de calificativo adecuado y disminuyendo su valor de calificativo debido a temperaturas más bajas, debido al gradiente de temperatura (Figura 15). Para esta variable, a mayor temperatura media, mayor peso de ponderación (Tabla 1).

Tabla 1. *Peso ponderado asignado Temperatura media*

Peso ponderado asignado	5	4	3	2	1
Calificación	Muy adecuado	Adecuado	Óptimo	Marginalmente adecuado	No apto
Rangos de temperatura (C°)	> 26.0	24.0 – 26.0	22.0 – 24.0	18.0 – 22.0	< 18.0

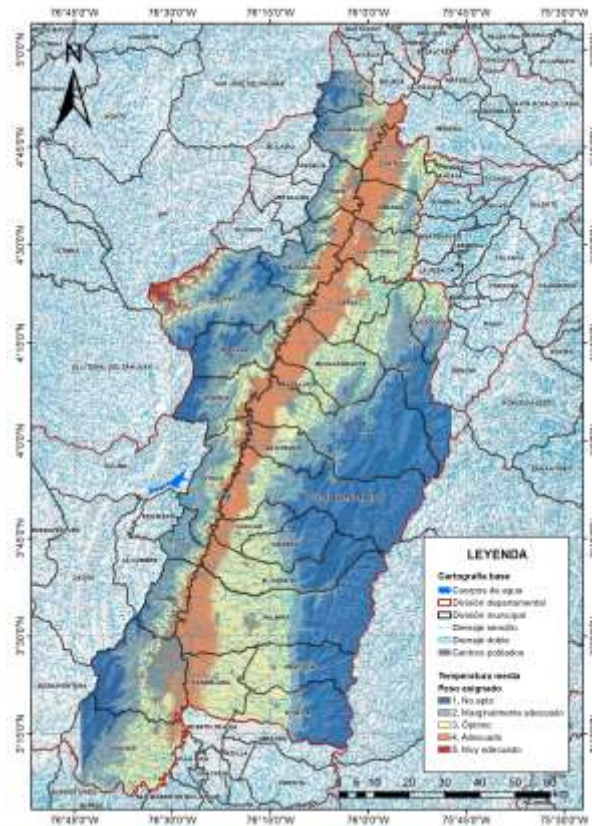


Figura 15. Temperatura media reclasificada.

### 7.7.3 Radiación solar

La calificación más alta respecto a valores de radiación solar, mostró una tendencia en las zonas planas de terrazas aluviales del valle del Río Cauca, con valores de calificativo adecuado muy adecuado principalmente. Para esta variable, a mayor radiación solar, mayor peso de ponderación (Figura 16). Para esta variable, a mayor radiación solar, mayor peso de ponderación. (Tabla 2).

Tabla 2. *Peso ponderado asignado Radiación solar*

Peso ponderado asignado	5	4	3	2	1
Calificación	Muy adecuado	Adecuado	Óptimo	Marginalmente adecuado	No apto
Rangos de temperatura (MJ m <sup>2</sup> mes <sup>-1</sup> )	> 400	350 – 400	300 – 350	250 – 300	< 250

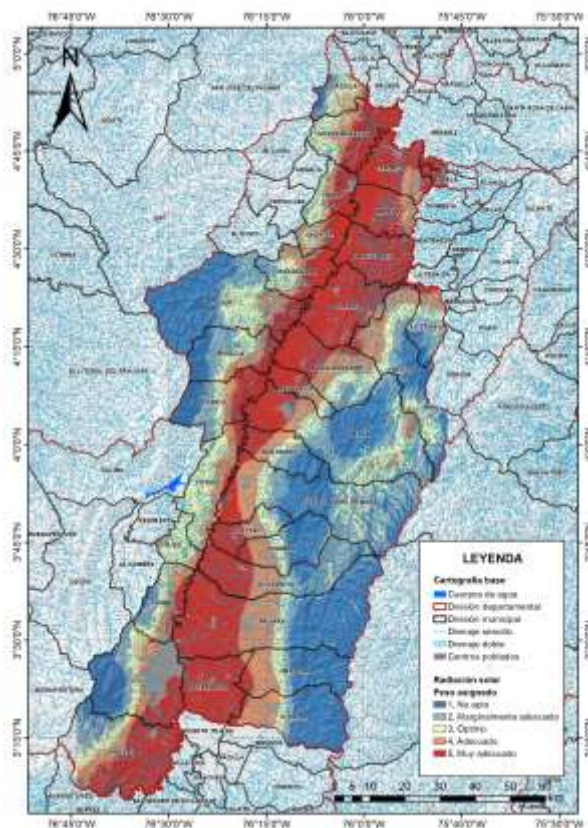


Figura 16. Radiación solar reclasificada.

### 7.7.4 Temperatura mínima

La calificación más alta respecto a valores de temperatura mínima correspondió al valle del Río Cauca, con valores de calificativo óptimo principalmente y disminuyendo su valor de calificativo debido a temperaturas más bajas, esto por el gradiente de temperatura (Figura 17). Para esta variable, a mayor temperatura mínima, mayor peso de ponderación (Tabla 3).

Tabla 3. *Peso ponderado asignado temperatura mínima*

Peso ponderado asignado	5	4	3	2	1
Calificación	Muy adecuado	Adecuado	Óptimo	Marginalmente adecuado	No apto
Rangos de temperatura (C°)	>22.0	20.0 – 22.0	18.0 - 20.0	16.0 – 18.0	< 16.0

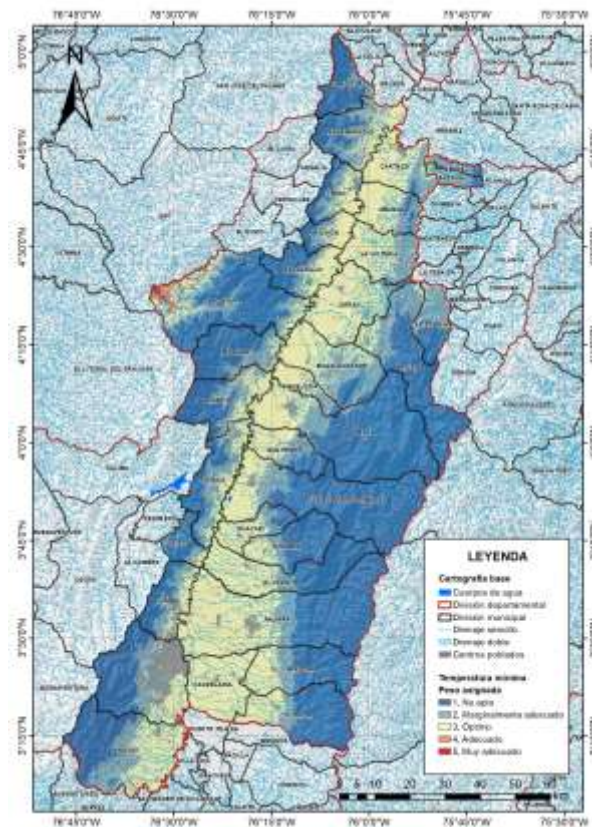


Figura 17. Temperatura mínima reclasificada.

### 7.7.5 Temperatura máxima

La calificación más alta respecto a valores de temperatura máxima correspondió al valle del Río Cauca, con valores de calificativo muy adecuado principalmente y disminuyendo su valor de calificativo debido a temperaturas más bajas por el gradiente de temperatura (Figura 18). Para esta variable, a mayor temperatura máxima, mayor peso de ponderación (Tabla 4).

Tabla 4. *Peso ponderado temperatura máxima*

Peso ponderado asignado	5	4	3	2	1
Calificación	Muy adecuado	Adecuado	Óptimo	Marginalmente adecuado	No apto
Rangos de temperatura (C°)	> 28	26.0 – 28.0	24.0 – 26.0	22.0 – 24.0	< 22.0

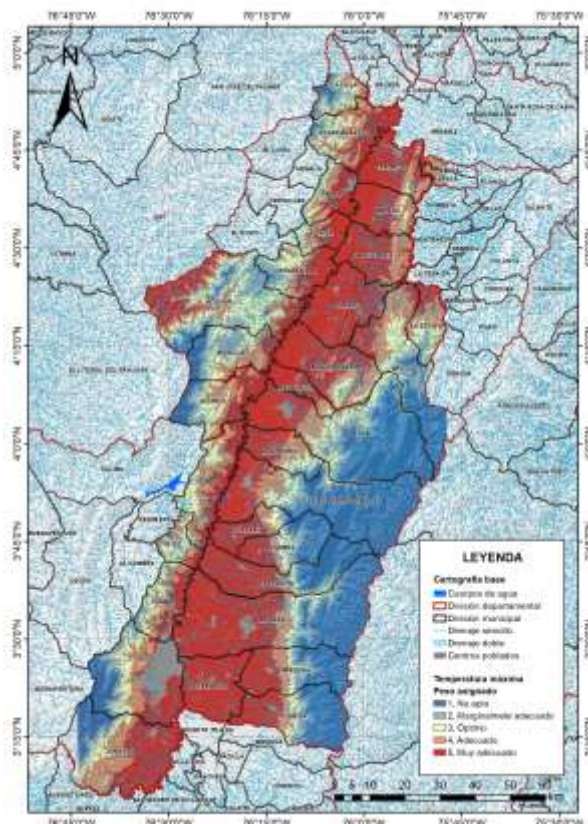


Figura 18. Temperatura máxima reclasificada.

### 7.7.6 Precipitación media anual

La calificación más alta respecto a valores de precipitación media anual correspondió puntualmente a los municipios de Jamundí y el Águila, con valores de calificativo muy adecuado (Figura 19). Para esta variable, a mayor precipitación al año, mayor peso de ponderación (Tabla 5).

Tabla 5. *Peso ponderado asignado precipitación media anual*

Peso ponderado asignado	5	4	3	2	1
Calificación	Muy adecuado	Adecuado	Óptimo	Marginalmente adecuado	No apto
Rangos de precipitación (mm/año)	>3000	2500 - 3000	2000 - 2500	1500 – 2000	<1500

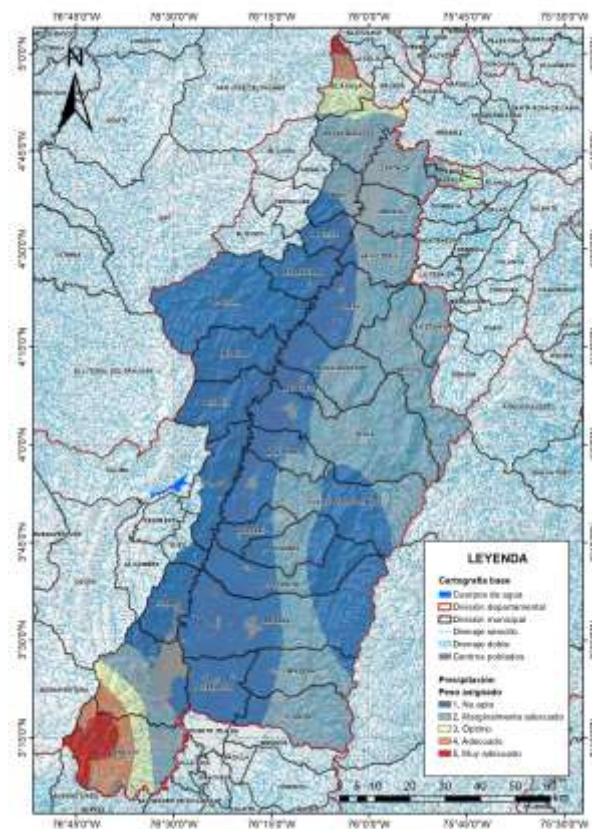


Figura 19. Precipitación media anual reclasificada.

### 7.7.7 Humedad relativa

Los mayores valores de humedad relativa correspondieron al flanco occidental de la cordillera central, con calificación promedio de adecuada y con calificación muy adecuada en los municipios de Florida, Pradera, Ulloa y Alcalá (Figura 20). Para esta variable, a mayor humedad relativa, menor peso de ponderación (Tabla 6).

Tabla 6. *Peso ponderado asignado humedad relativa*

Peso ponderado asignado	5	4	3	2	1
Calificación	Muy adecuado	Adecuado	Óptimo	Marginalmente adecuado	No apto
Rangos de humedad relativa (%)	< 70	70.0 – 75.0	75.0 – 80.0	80.0 – 85.0	> 85.0

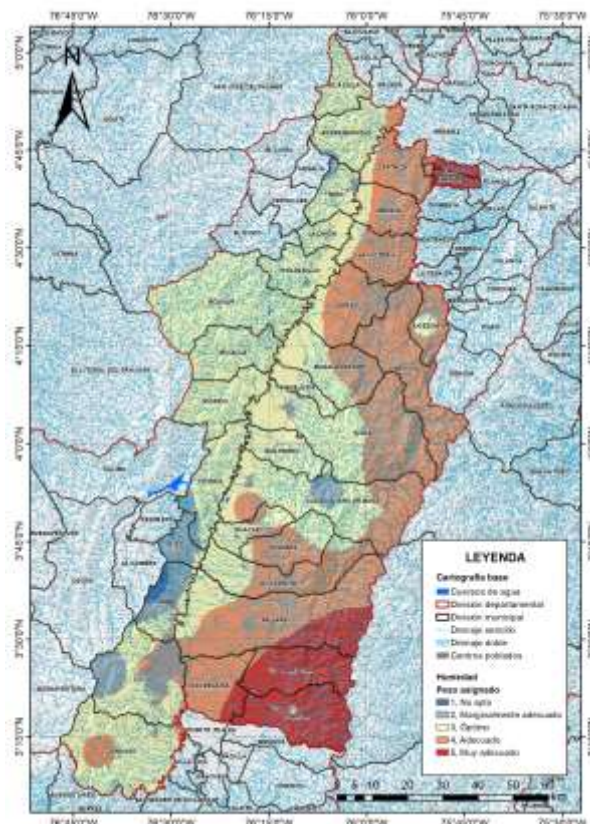


Figura 20. Humedad relativa reclasificada.

### 7.7.8 Altitud

La calificación más alta respecto a valores de altitud correspondió al valle del Río Cauca, (Figura 21), el cual presenta los valores más bajos de altitud, con valores de calificativo óptimo principalmente y disminuyendo su valor de calificativo a medida que aumenta la elevación sobre el nivel del mar (Tabla 7).

Tabla 7. *Peso ponderado asignado altitud*

Peso ponderado asignado	5	4	3	2	1
Calificación	Muy adecuado	Adecuado	Óptimo	Marginalmente adecuado	No apto
Rangos de altitud (msnm)	< 700	700 – 900	900 – 1100	1100 – 1300	> 1300

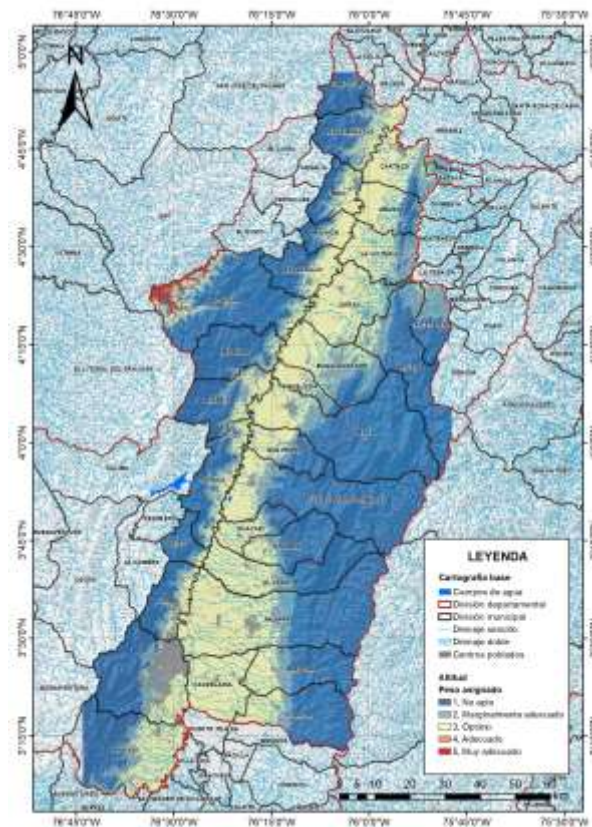


Figura 21. Altitud reclassificada.

### 7.7.9 Pendiente

La calificación más alta respecto a valores de pendiente del terreno, correspondió al valle del Río Cauca, (Figura 22), el cual presenta los valores más bajos de inclinación del terreno, presentando geoformas de tipo fluvial deposicional, con valores de calificativo Muy adecuado principalmente y disminuyendo su valor de calificativo al aumentar el grado de inclinación del terreno (Tabla 8).

Tabla 8. *Peso ponderado asignado pendiente*

Peso ponderado asignado	5	4	3	2	1
Calificación	Muy adecuado	Adecuado	Óptimo	Marginalmente adecuado	No apto
Rangos de inclinación del terreno (%)	< 5.0	5.0 – 10.0	10.0 – 15.0	15.0 – 20.0	> 20

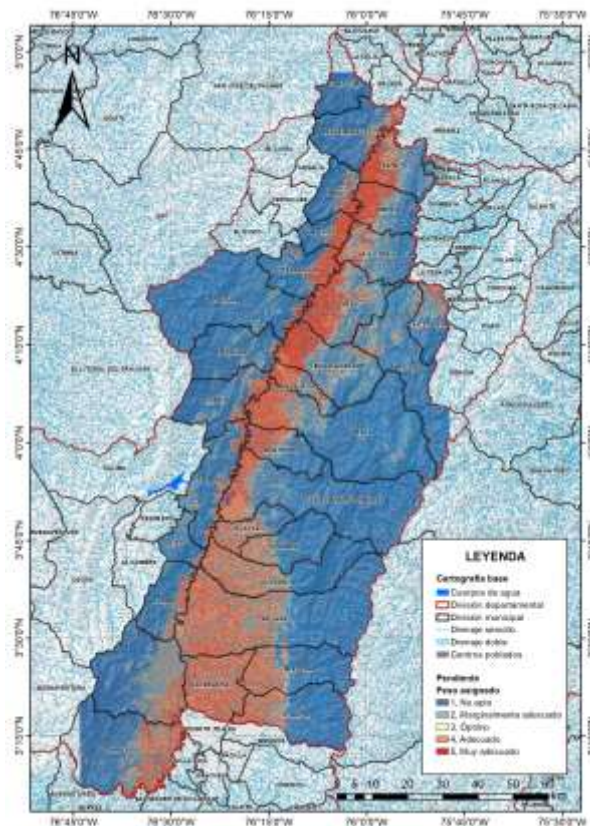


Figura 22. Pendientes reclasificadas.

### 7.7.10 pH

El potencial de hidrógeno para medir el grado de acidez evidencia que los suelos de los municipios analizados son principalmente básicos (Figura 23), al igual que el resultado de estudios como (Patiño-González *et al.*, 2006) que marcan una tendencia en sus resultados de suelos básicos en la zona cafetera del departamento (Tabla 9).

Tabla 9. *Peso ponderado asignado pH*

Peso ponderado asignado	5	4	3	2	1
Calificación	Muy adecuado	Adecuado	Óptimo	Marginalmente adecuado	No apto
Rangos de pH	> 6.0	5.5 – 6.0	5.0 – 5.5	4.8 – 5.0	< 4.8

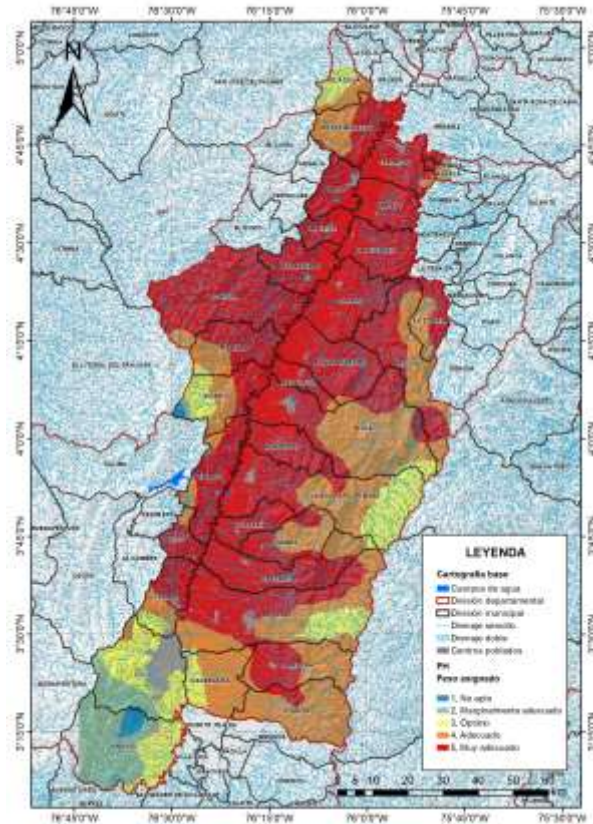


Figura 23. pH reclasificado.

### 7.7.11 Contenido de materia orgánica

Para la totalidad de los municipios de análisis se presenta en general suelos con porcentaje bajo de materia orgánica (<8%), al igual que el resultado de estudios como (Patiño-González et al., 2006), que marcan una tendencia en sus resultados de suelos con bajo contenido de materia orgánica en la zona cafetera del departamento (Figura 24), esto debido a condiciones del material parietal de la roca y la temperatura (Tabla 10).

Tabla 10. *Peso ponderado asignado contenido materia orgánica*

Peso ponderado asignado	5	4	3	2	1
Calificación	Muy adecuado	Adecuado	Óptimo	Marginalmente adecuado	No apto
Rangos de contenido de materia orgánica (%)	> 14	12 – 14	10 – 12	8 – 10	< 8

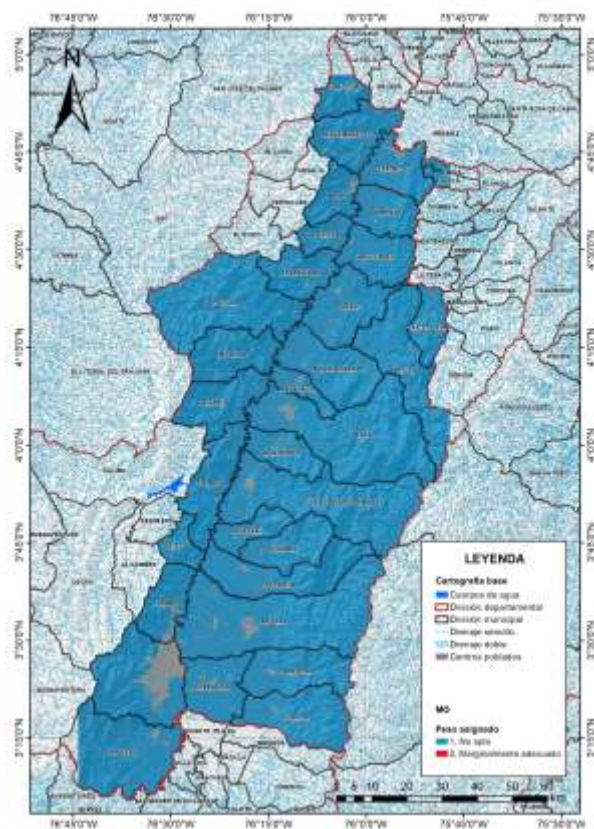


Figura 24. Contenido de materia orgánica reclasificado.

### 7.7.12 Capacidad de intercambio catiónico

Para la totalidad de municipios de análisis (Figura 25), se presenta una alta capacidad de intercambio catiónico ( $\text{cmolc kg}^{-1}$ ) con valores desde 15 a mayores de 20 (Tabla 11).

Tabla 11. *Peso ponderado asignado capacidad de intercambio catiónico*

Peso ponderado asignado	5	4	3	2	1
Calificación	Muy adecuado	Adecuado	Óptimo	Marginalmente adecuado	No apto
Rangos de capacidad de intercambio catiónico ( $\text{cmolc kg}^{-1}$ )	> 20	15.0 – 20.0	10.0 – 15.0	5.0 – 10.0	< 5.0

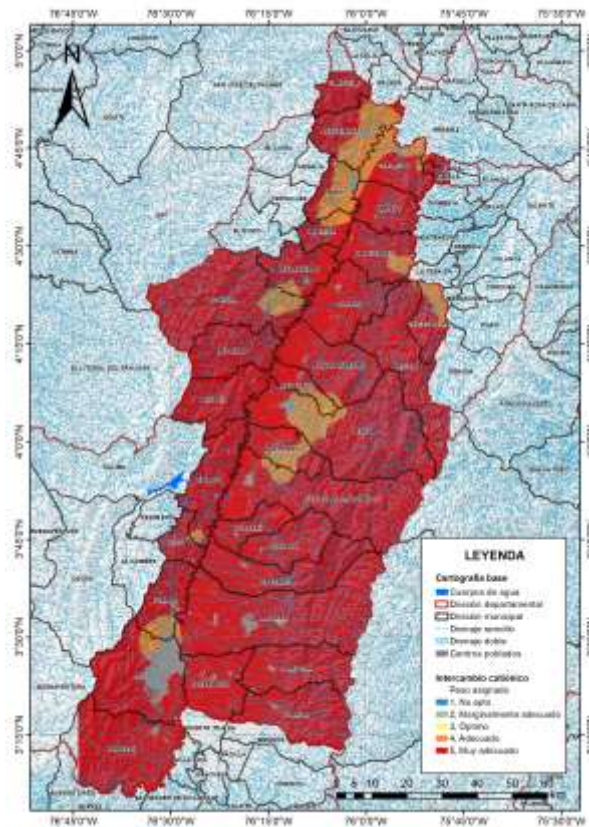


Figura 25. Capacidad de intercambio catiónico reclasificado.

### 7.7.13 Fósforo

Respecto al contenido de fósforo en los suelos (Figura 26), en general, se presentan suelos con bajo contenido en fósforo ( $< 5.0$  cmolc  $\text{kg}^{-1}$ ), donde (Patiño-González *et al.*, 2006), describe los suelos de cenizas volcánicas como característicos de una alta capacidad de fijación de este elemento (Tabla 12).

Tabla 12. *Peso ponderado asignado Fósforo*

Peso ponderado asignado	5	4	3	2	1
Calificación	Muy adecuado	Adecuado	Óptimo	Marginalmente adecuado	No apto
Rangos de contenido de fósforo ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	$> 20$	15.0 – 20.0	10.0 – 15.0	5.0 – 10.0	$< 5.0$

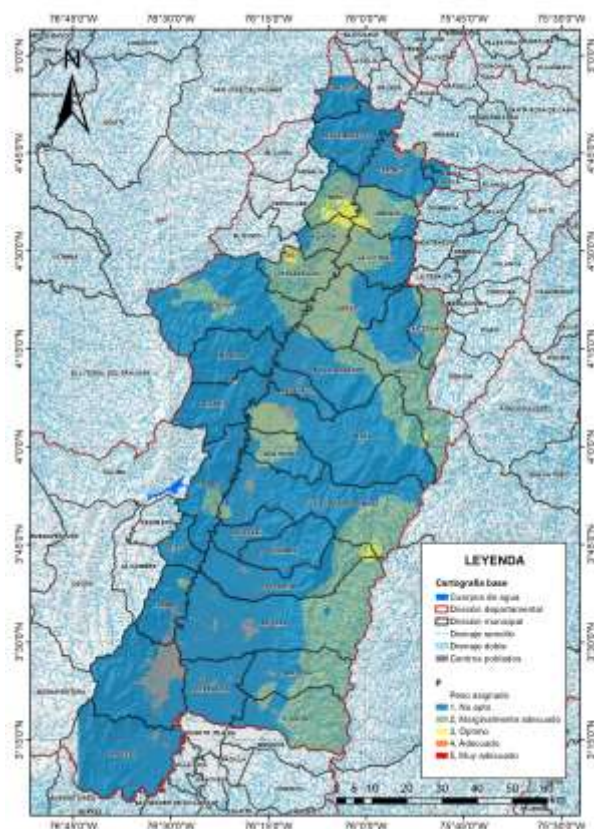


Figura 26. Fósforo reclasificado.

### 7.7.14 Calcio

Para la mayoría del área de estudio se presentan suelos con un bajo contenido de calcio ( $> 8.0 \text{ cmolc kg}^{-1}$ ) (Figura 27) pero muy adecuado para el cultivo de café robusta (Tabla 13).

Tabla 13. *Peso ponderado asignado Calcio*

Peso ponderado asignado	5	4	3	2	1
Calificación	Muy adecuado	Adecuado	Óptimo	Marginalmente adecuado	No apto
Rangos de contenido de calcio ( $\text{cmolc kg}^{-1}$ )	$> 8.0$	6.0 – 8.0	4.0 – 6.0	2.0 – 4.0	$< 2.0$

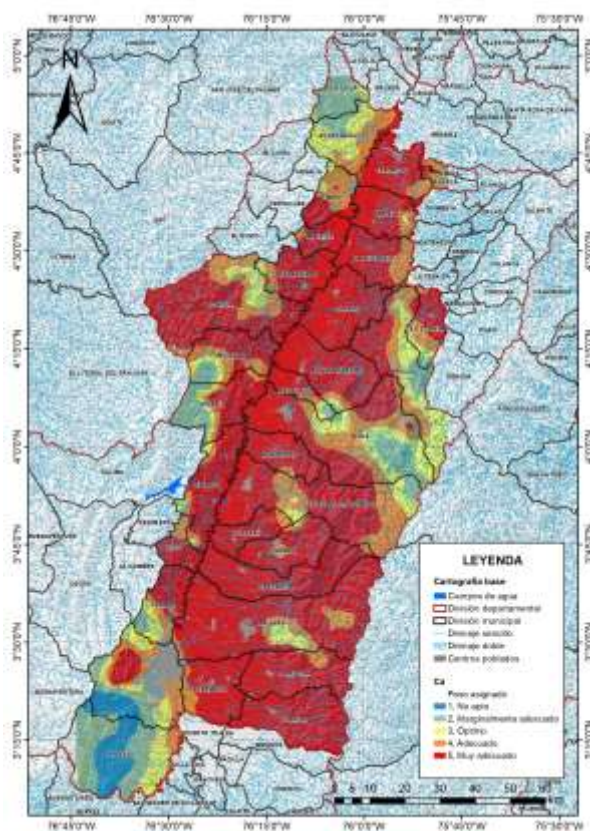


Figura 27. Calcio reclasificado.

### 7.7.15 Magnesio

Se observa una concentración alta en magnesio en la zona del valle geográfico del río Cauca (Figura 28), mientras que en las zonas montañosas y en el sur del área de estudio, se presenta una concentración menor (Tabla 14).

Tabla 14. *Peso ponderado asignado Magnesio*

Peso ponderado asignado	5	4	3	2	1
Calificación	Muy adecuado	Adecuado	Óptimo	Marginalmente adecuado	No apto
Rangos de contenido de magnesio (cmolc kg <sup>-1</sup> )	> 4.0	3.0 – 4.0	2.0 – 3.0	1.0 – 2.0	< 1.0

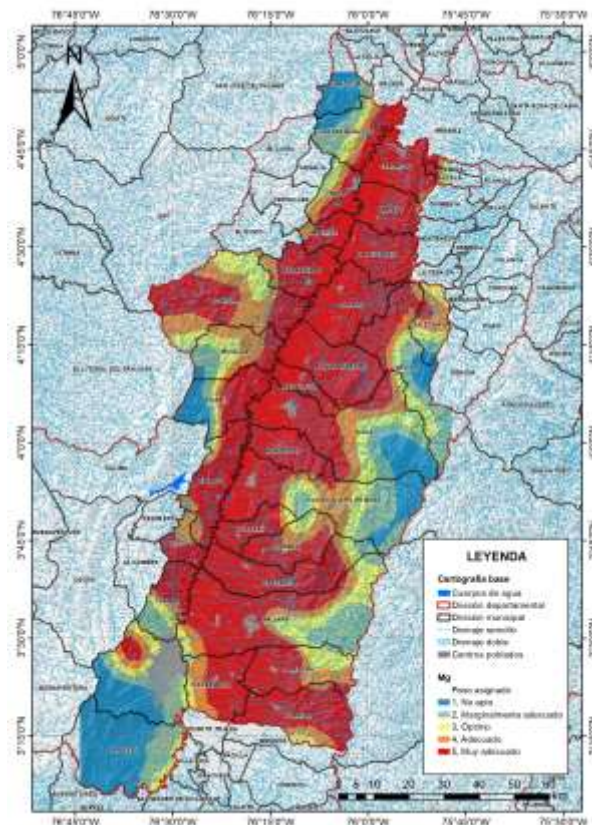


Figura 28. Magnesio reclasificado.

### 7.7.16 Potasio

Según el contenido de magnesio se presentan en la mayoría de los municipios condiciones marginalmente adecuadas (Figura 29), seguido de condiciones óptimas según el contenido de éste (Tabla 15).

Tabla 15. *Peso ponderado asignado Potasio*

Peso ponderado asignado	5	4	3	2	1
Calificación	Muy adecuado	Adecuado	Óptimo	Marginalmente adecuado	No apto
Rangos de contenido de potasio (cmolc kg <sup>-1</sup> )	> 0.6	0.45 – 0.6	0.3 – 0.45	0.15 – 0.3	< 0.15

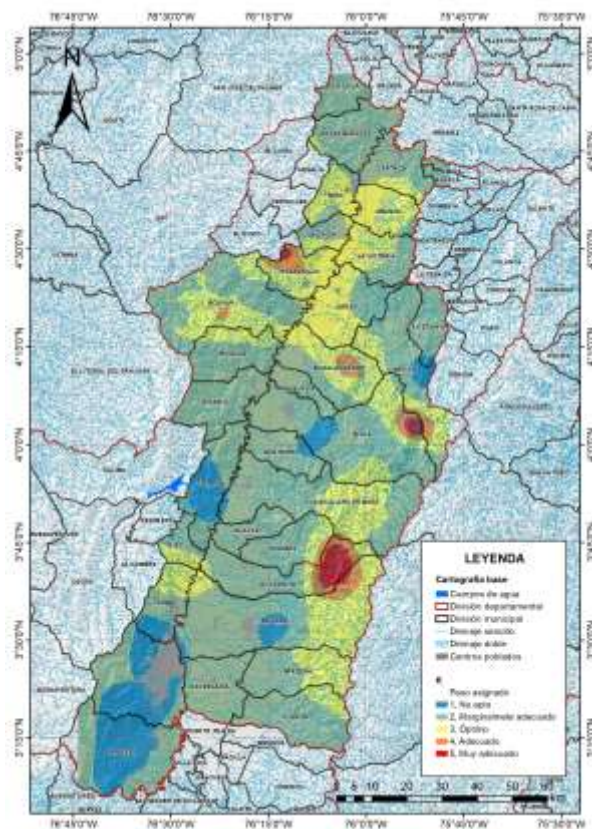


Figura 29. Potasio reclasificado.

### 7.7.17 Arena

Se presentan principalmente suelos con porcentaje de arena entre el 45 al 60% de contenido de esta (Figura 30), seguido de suelo con porcentaje de arena mayor al 60% (Tabla 16).

Tabla 16. *Peso ponderado asignado Arena*

Peso ponderado asignado	5	4	3	2	1
Calificación	Muy adecuado	Adecuado	Óptimo	Marginalmente adecuado	No apto
Rangos de contenido de arena (%)	> 60	45 - 60	30 - 45	15 - 30	< 15

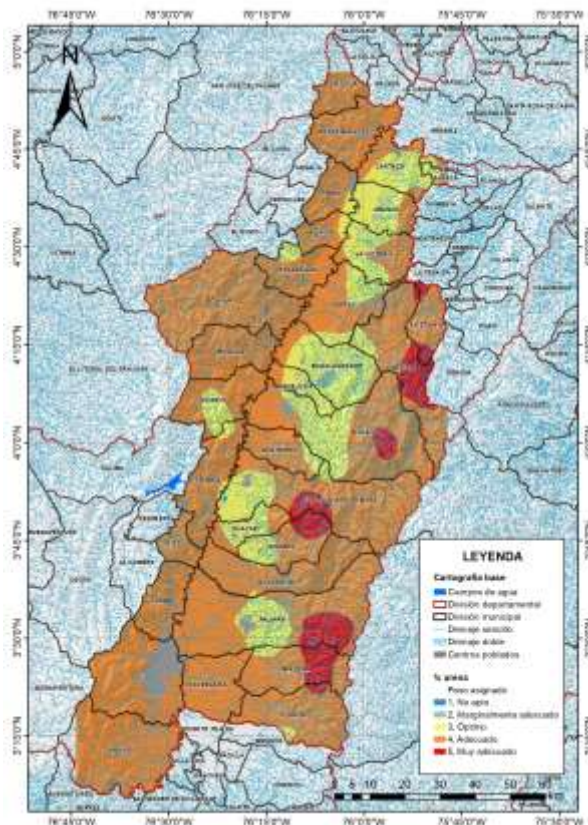


Figura 30. Porcentaje de arena reclasificado.

### 7.7.18 Sumatoria de las variables reclasificadas

Teniendo cada una de las variables con un calificativo, se realiza la sumatoria de capas utilizando herramientas SIG, mediante la unión de las capas vectoriales resultantes del cálculo de los índices de clima, topografía y suelo, la ponderación de cada una de estas y la sumatoria de las capas a partir de álgebra de mapas según la siguiente ecuación y a partir de la propuesta de Villegas et al 2023 para el cálculo de índices:

- **Climatología**

Las variables de climatología, las cuales son las referentes a temperatura media, mínima y máxima, precipitación, y humedad relativa, se ponderan y califican en orden de importancia, teniendo la temperatura media el mayor peso de ponderación. Estas variables ponderadas se suman según la siguiente ecuación:

Ecuación 4. *Climatología*

$$Clima_I = 0.3(Tmed) + 0.2(RadS) + 0.15(Tmin) + 0.15(Tmax) + 0.15(Precip) + 0.05(HumRelat)$$

Donde:  $Clima_I$  = Índice de factores climáticos,  $Tmed$  = Temperatura media  $RadS$  = Radiación solar,  $Tmin$  = Temperatura mínima,  $Tmax$  = Temperatura máxima  $Precip$  = Precipitación media anual  $Hum Relat$  = Humedad relativa

Esta ecuación da como resultado el mapa final de zonificación potencial según el clima el cual se presenta en la Figura 31. Zonificación potencial según el clima.

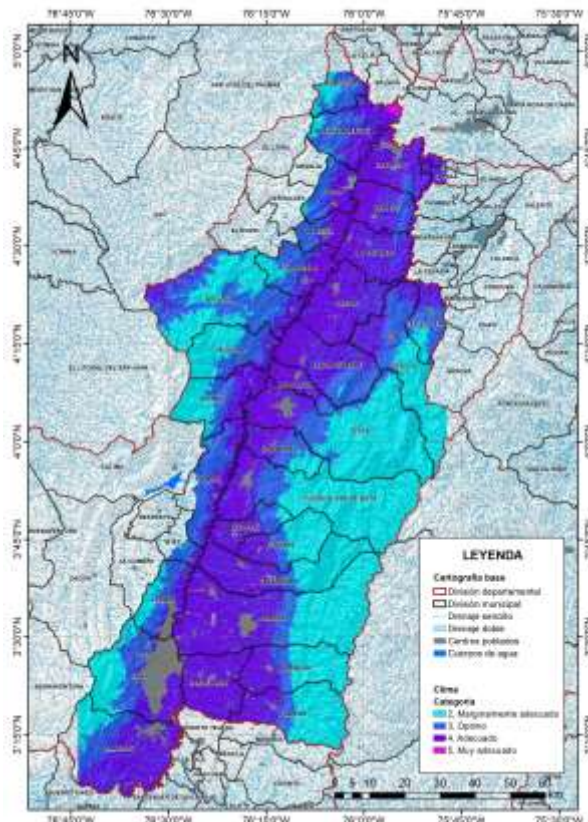


Figura 31. Zonificación potencial según el clima.

- **Morfometría del terreno:**

Las variables de la morfometría del terreno, que son la inclinación del terreno en porcentaje y la altitud, se ponderan y califican en orden de importancia, teniendo la altitud el mayor peso de ponderación. Estas variables ponderadas se suman según la siguiente ecuación:

Ecuación 5. *Morfometria del terreno*

$$Topo_I = 0.6(Elev) + 0.4(Pendiente)$$

Donde:  $Topo_I$  = Índice de topografía  $Elev$  = Elevación  $Pendiente$  = Pendiente

Esta ecuación da como resultado el mapa final de zonificación potencial según la topografía el cual se presenta en la Figura 32.

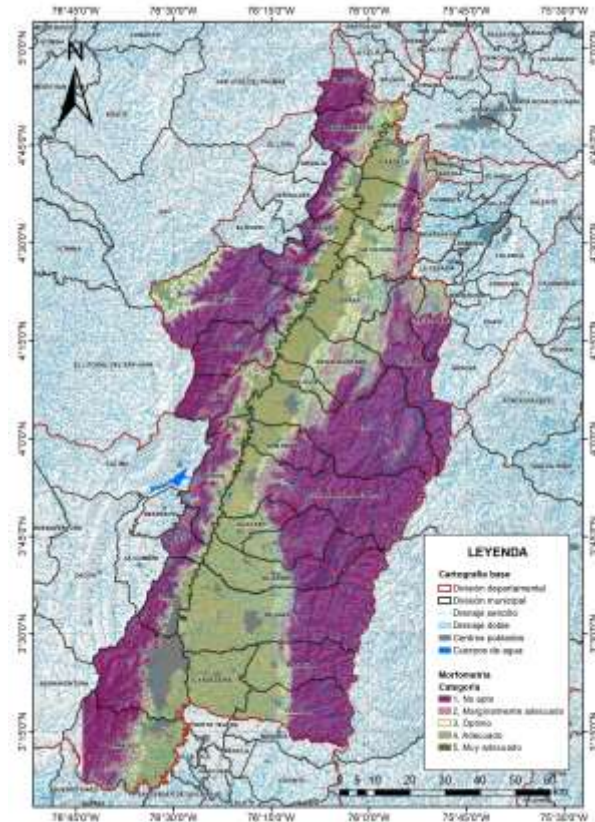


Figura 32. Zonificación potencial según la topografía.

- **Suelo**

Las variables de las propiedades fisicoquímicas del suelo, las cuales son el pH, porcentaje de contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, fósforo, calcio, Magnesio, Potasio y porcentaje de arena, se ponderan y califican en orden de importancia, teniendo el pH el mayor peso de ponderación. Estas variables ponderadas se suman según la siguiente ecuación:

Ecuación 6. *Suelo*

$$Suelo_1 = 0.2(pH) + 0.2(OM) + 0.15(CEC) + 0.1(P) + 0.1(Ca)0.1(Mg) + 0.1(K) + 0.05(\%arena)$$

Donde: *Suelo<sub>1</sub>* = Índice de suelo, *pH*=Potencial de hidrógeno, *CEC*=Capacidad de intercambio catiónico, *P*=Fósforo, *Ca*=Calcio, *Mg*=magnesio, *K*=Potasio, *%arena*= Porcentaje de arena.

Esta ecuación da como resultado el mapa final de zonificación potencial según el suelo, el cual se presenta en la (figura 31).

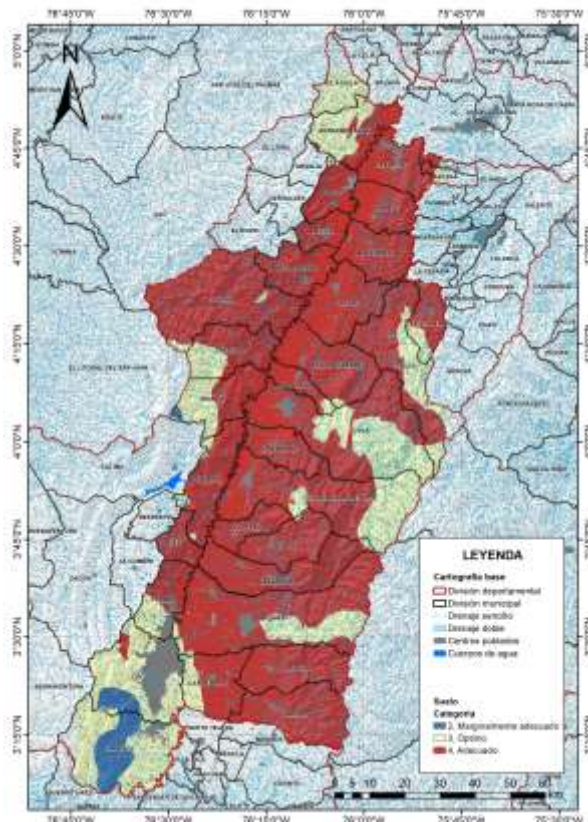


Figura 33. Zonificación potencial según el suelo.

Finalmente se aplica la ecuación de la sumatoria de los grupos de las variables, asignando a cada índice un valor de ponderación, siendo el clima, el factor con mayor peso ponderado en el análisis.

Ecuación 7. *Zonificación potencial*

$$ZonPoten = 0.5(Clima_I) + 0.3(Topo_I) + 0.2(Suelo_I)$$

Donde:  $ZonPoten$  = Índice de zonificación potencial;  $Clima_I$  = Índice de factores climáticos;  $Topo_I$  = Índice de topografía;  $Suelo_I$  = Índice de suelo

Este índice de zonificación potencial, se observa en la Figura 34

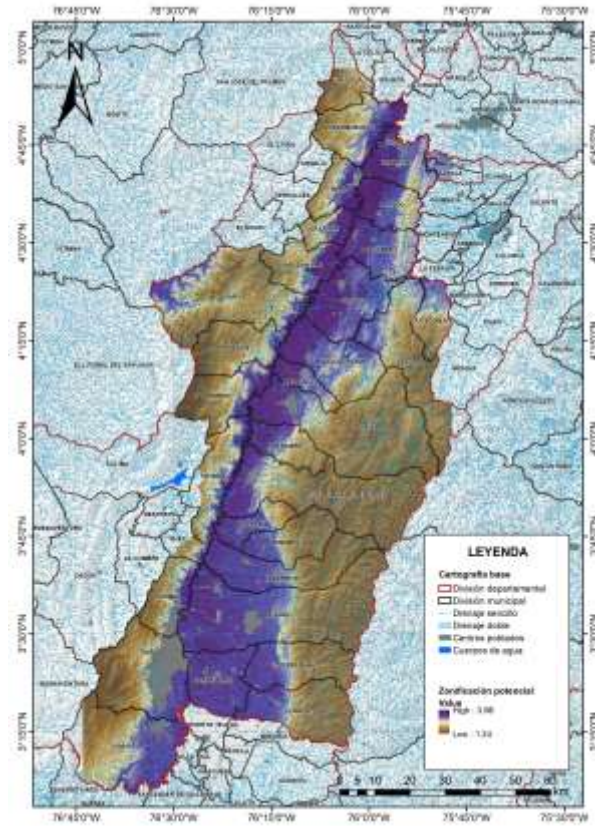


Figura 34. Índice de zonificación potencial.

### 7.7.19 Áreas excluidas del análisis

Se realiza la extracción de áreas que, por sus restricciones ambientales y vocación de uso, no se puede utilizar el suelo para prácticas agrícolas como son las fajas forestales protectoras de cauces, bosques naturales, áreas reconocidas por el SINAP o por la CVC de protección ambiental, cuerpos de agua artificiales o naturales (ríos, lagos, lagunas o embalses) como se puede observar en la Figura 35, teniendo como resultado el área potencial neta para cultivos de Robusta.

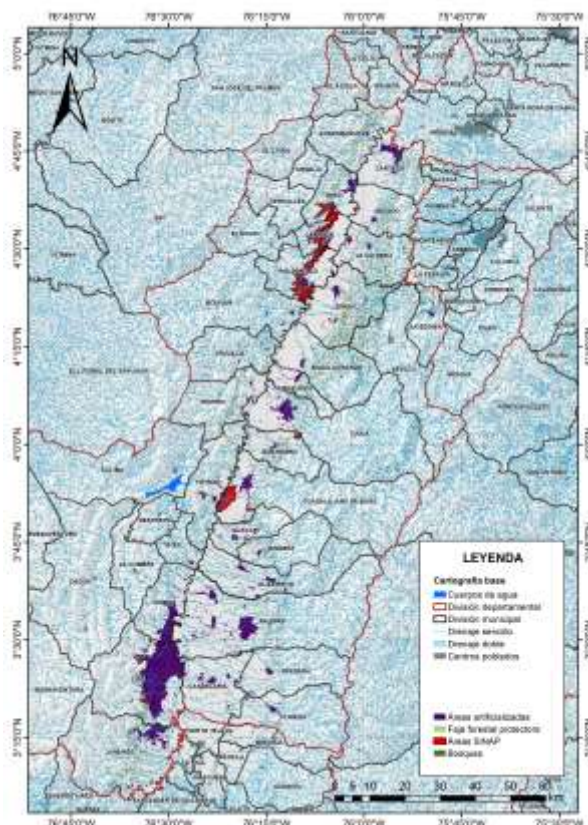


Figura 35. Áreas extraídas de la zonificación potencial.

### 7.7.20 Validación de los resultados

Con el área de la zonificación potencial final, se plantean dos métodos de validación de resultados. El primero, partir de la Ecuación 8, se determina el número total de puntos para realizar la validación de los resultados:

Ecuación 8. *Validación de resultados*

$$n = \frac{N * Z * p * q}{d^2 * (N - 1) + Z * p * q}$$

Donde: n= número total de puntos para validación; N= población total, correspondiente al número de veredas; Z=95%; p= proporción esperada (5%); q= 1-p; d=Precisión (5%).

En total, se requieren para la validación, 64 puntos, los cuales, a partir de una distribución aleatoria, se verificó el tipo de cobertura presente, la cual

Tabla 17. *Tipo de cobertura en los puntos de validación.*

<b>Tipo de cobertura</b>	<b>Total puntos de muestreo</b>
Arbustal	6
Canales	1
Cereales	1
Cultivos permanentes arbustivos	1
Cultivos permanentes herbáceos	34
Herbazal	1
Oleaginosas y leguminosas	1
Otros cultivos transitorios	1
Pastos arbolados	1
Pastos limpios	15
Vegetación secundaria o en transición	1
Zonas de extracción minera	1
<b>Total general</b>	<b>64</b>

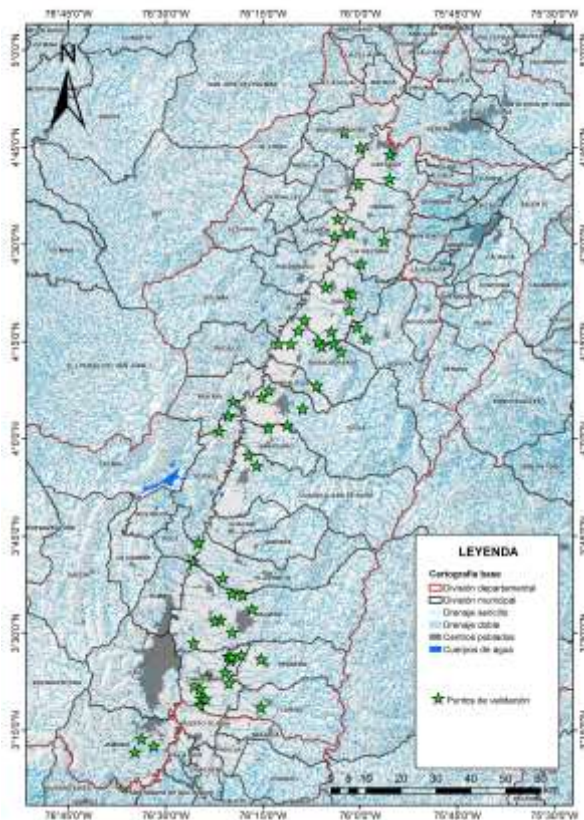


Figura 36. Localización de puntos de validación.

Posteriormente, se realiza otra verificación de los usos actuales del suelo presentes, a partir de validación cruzada de la capa de coberturas de la tierra del departamento del Valle del Cauca. De esta validación se encontró que las principales coberturas actuales en el área potencial son cultivos permanentes herbáceos (203889 hectáreas), pastos limpios (86898 hectáreas), arbustal (16423 hectáreas) pastos arbolados (14155 hectáreas) y cereales (10901 hectáreas) como se evidencia en la Tabla 18 y en la Figura 37.

Tabla 18. *Tipos de coberturas de la tierra en el área de estudio*

<b>Tipo de cobertura</b>	<b>Área (hectáreas)</b>
Tejido urbano continuo	1.0
Tejido urbano discontinuo	2.3
Zonas industriales o comerciales	0.1
Red vial, ferroviarias y terrenos asociados	1.9
Obras hidráulicas	12.2
Zonas de extracción minera	758.1
Zonas de disposición de residuos	87.8
Zonas verdes urbanas	6.5
Instalaciones recreativas	2718.5
Otros cultivos transitorios	3146.7
Cereales	10901.7
Oleaginosas y leguminosas	2033.2
Hortalizas	27.3
Tubérculos	137.1
Cultivos permanentes herbáceos	203889.3
Cultivos permanentes arbustivos	3591.2
Cultivos permanentes arbóreos	4802.7
Cultivos agroforestales	25.3
Cultivos confinados	46.8
Pastos limpios	86898.9
Pastos arbolados	14155.8
Pastos enmalezados	9315.5
Mosaico de cultivos	367.1
Mosaico de pastos y cultivos	3265.0
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	1180.2
Mosaico de pastos con espacios naturales	1011.1
Mosaico de cultivos y espacios naturales	35.7
Bosque denso	128.8
Bosque abierto	193.7
Bosque fragmentado	71.1
Bosque de galería y ripario	78.8
Plantación forestal	328.0
Herbazal	6706.3
Arbustal	16423.9
Vegetación secundaria o en transición	2057.7
Zonas arenosas naturales	102.7
Tierras desnudas y degradadas	2444.9
Zonas quemadas	32.6
Zonas Pantanosas	2352.5
Ríos (50 m)	825.8
Lagunas, lagos y ciénagas naturales	5.0
Canales	1939.1
Cuerpos de agua artificiales	1284.0

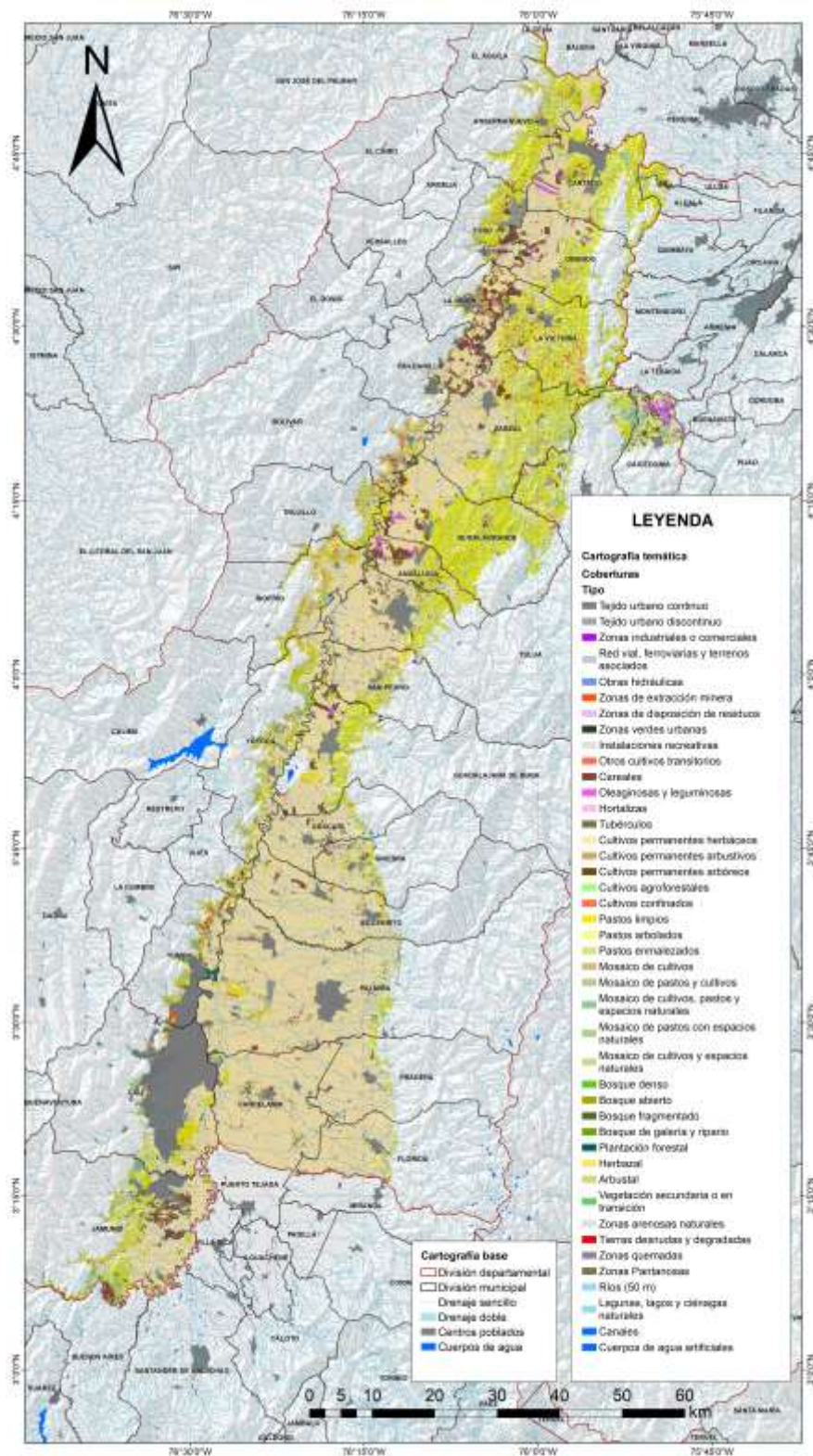


Figura 37. Coberturas de la tierra en el área potencial.



# 8.Resultados

## 8.1 Zonificación potencial

Una vez obtenido como resultado el índice de zonificación potencial, la extracción de las áreas con restricciones ambientales y de vocación de uso, además de restringir el resultado al área de estudio representada en la Figura 2. Localización del área de estudio., y la reclasificación en cinco clases que son: 5/ Muy adecuado (describe condiciones muy adecuadas para el desarrollo del cultivo), 4/ Adecuado (tiene condiciones adecuadas para el cultivo y sin restricciones), 3/ Óptimo (tiene condiciones adecuadas para el cultivo), 2/ Marginalmente adecuado (condiciones con algunas restricciones que se pueden manejar con agronomía) y 1/ No apto (área con restricciones de clima y suelo), asignados según los rangos establecidos para la zonificación potencial de café Robusta (Villegas et al., 2023) (FAO, 2014), se presenta como resultado el mapa de zonificación potencial de café Robusta (Figura 39. Zonificación potencial de Café robusta en el departamento del Valle del Cauca.

Cabe resaltar que, en Colombia, es el segundo estudio que se realiza a esta escala de detalle. El primero fue de (Villegas et al., 2023), en el cual realizaron la caracterización agroecológica en la zona centro – sur del departamento de Caldas, empleando al igual que este trabajo, los parámetros de la FAO al igual que este estudio, como son las condiciones climáticas, topografía, temperatura, precipitación, radiación solar y condiciones de suelos para determinar las zonas apropiadas para el cultivo de café Robusta. Otro estudio al respecto es el de (González-Orozco et al., 2024), en el cual, proponen identificar las áreas en Colombia con mayor potencial biofísico y socioeconómico para el cultivo de café robusta, donde utilizan un enfoque que combina la adecuación climática y el modelado de rendimientos de cultivos para escenarios climáticos actuales y futuros, diferenciándose de este estudio y del estudio de Villegas et al., en la escala de trabajo y los insumos utilizados, ya que este estudio abarca una escala regional (nivel Colombia) con insumos de menor detalle y un análisis diferente.

En esta zonificación dió como resultado 328597.1 hectáreas como áreas adecuadas y 54578.8 hectáreas como áreas óptimas para el potencial cultivo de café Robusta de el departamento del Valle del Cauca para los municipios de Alcalá, Andalucía, Ansermanuevo, Bolívar, Bugalagrande, Caicedonia, Cali, Candelaria, Cartago, El Águila, El Cerrito, Florida, Ginebra, Guacarí, Guadalajara De Buga, Jamundí, La Unión, La Victoria, Obando, Palmira, Pradera, Riofrío, Roldanillo, San

Pedro, Sevilla, Toro, Trujillo, Tuluá, Ulloa, Vijes, Yotoco, Yumbo y Zarzal y sus respectivas veredas, las cuales son en total 356 que presentan áreas potenciales.

Respecto a los municipios analizados, el 33% del área total de los municipios de análisis presentan potencial para el cultivo de café robusta ver Figura 38, Figura 39 y Tabla 19.

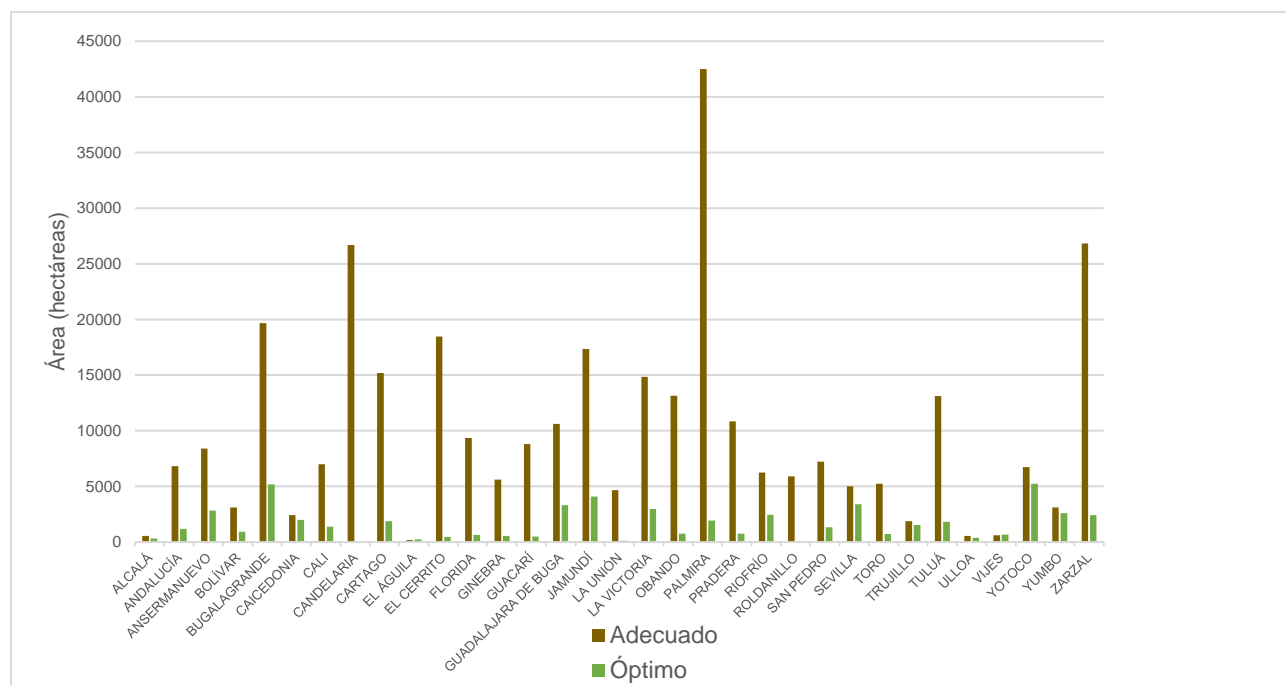


Figura 38. Áreas adecuadas y óptimas de los municipios para el cultivo de café Robusta.

Tabla 19. Áreas adecuadas y óptimas de los municipios para el cultivo de café Robusta

MUNICIPIO	Categoría		Área (hectáreas)
	Adecuado	Óptimo	
ALCALÁ	545.9	321.9	867.8
ANDALUCÍA	6812.4	1197.1	8009.5
ANSERMANUEVO	8396.9	2832.3	11229.2
BOLÍVAR	3107.7	927.5	4035.2
BUGALAGRANDE	19660.5	5178.1	24838.6
CAICEDONIA	2419.4	1981.7	4401.1
CALI	6983.6	1378.7	8362.3
CANDELARIA	26687.3	12.0	26699.4
CARTAGO	15190.0	1883.8	17073.8
EL ÁGUILA	188.3	219.8	408.0
EL CERRITO	18466.3	450.1	18916.4
FLORIDA	9355.3	624.0	9979.3
GINEBRA	5600.2	547.3	6147.5
GUACARÍ	8804.7	494.0	9298.6
GUADALAJARA DE BUGA	10625.5	3322.2	13947.7
JAMUNDÍ	17332.7	4093.4	21426.1
LA UNIÓN	4651.7	126.3	4778.0
LA VICTORIA	14837.9	2958.0	17795.9
OBANDO	13134.1	745.0	13879.1
PALMIRA	42502.3	1926.8	44429.1
PRADERA	10839.4	738.6	11578.0
RIOFRÍO	6248.0	2460.3	8708.3
ROLDANILLO	5900.4	75.0	5975.4
SAN PEDRO	7229.8	1318.5	8548.3
SEVILLA	5002.4	3403.1	8405.6
TORO	5242.8	712.6	5955.5
TRUJILLO	1864.6	1516.5	3381.1
TULUÁ	13122.0	1825.5	14947.5
ULLOA	551.8	378.2	930.0
VIJES	613.8	674.2	1288.1
YOTOCO	6741.5	5241.1	11982.5
YUMBO	3119.8	2594.9	5714.7
ZARZAL	26818.0	2420.5	29238.5
<b>Total general</b>	<b>328597.2</b>	<b>54578.9</b>	<b>383176.0</b>

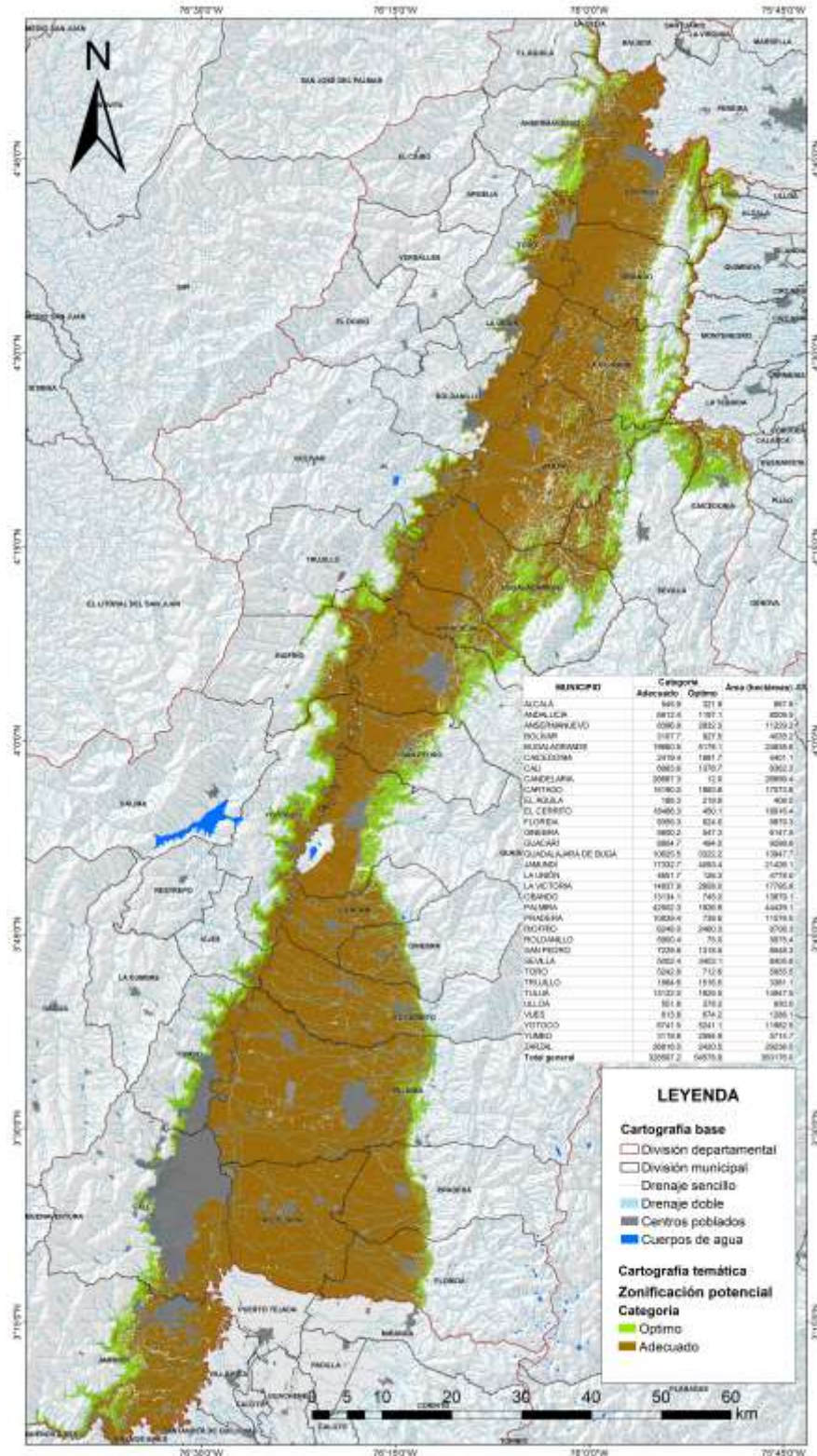


Figura 39. Zonificación potencial de Café robusta en el departamento del Valle del Cauca.

## 8.2 Áreas potenciales para la siembra de café robusta

Del total del área analizada, los municipios de Candelaria, Zarzal, Andalucía, La Victoria y Cartago, presentan el mayor porcentaje de densidad del total del municipio como potencial para el cultivo de café Robusta la cual se presenta en la tabla y la localización y distribución de las áreas potenciales de estos municipios se presentan en la Figura 40. Mientras que el municipio de Palmira, presenta la mayor área potencial para el cultivo de café robusta, siendo en total 44429 hectáreas, de las cuales 42502 son adecuadas y 1926 son óptimas, ver Tabla 20, Tabla 21 y Figura 40, Figura 41.

Tabla 20. *Áreas potenciales para la siembra de café robusta de los municipios de Candelaria, Zarzal, Andalucía, La Victoria, Cartago, Obando, Bugalagrande, Guacarí, Palmira, El Cerrito, San Pedro, La Unión, Ansermanuevo, Yotoco y Jamundí.*

Municipio	Área total del municipio (hectáreas)	Área potencial para el cultivo de café robusta (hectáreas)	Porcentaje del municipio para el cultivo de café robusta
Candelaria	29593	26699	90%
Zarzal	36733	29239	80%
Andalucía	11027	8010	73%
Cartago	24783	17074	69%
La Victoria	26427	17796	67%
Obando	21434	13879	65%
Bugalagrande	39612	24839	63%
Guacarí	16221	9299	57%
Palmira	100339	44429	44%
El Cerrito	44112	18916	43%
San Pedro	20178	8548	42%
La Unión	12067	4778	40%
Ansermanuevo	30495	11229	37%
Yotoco	32720	11983	37%
Jamundí	62772	21426	34%

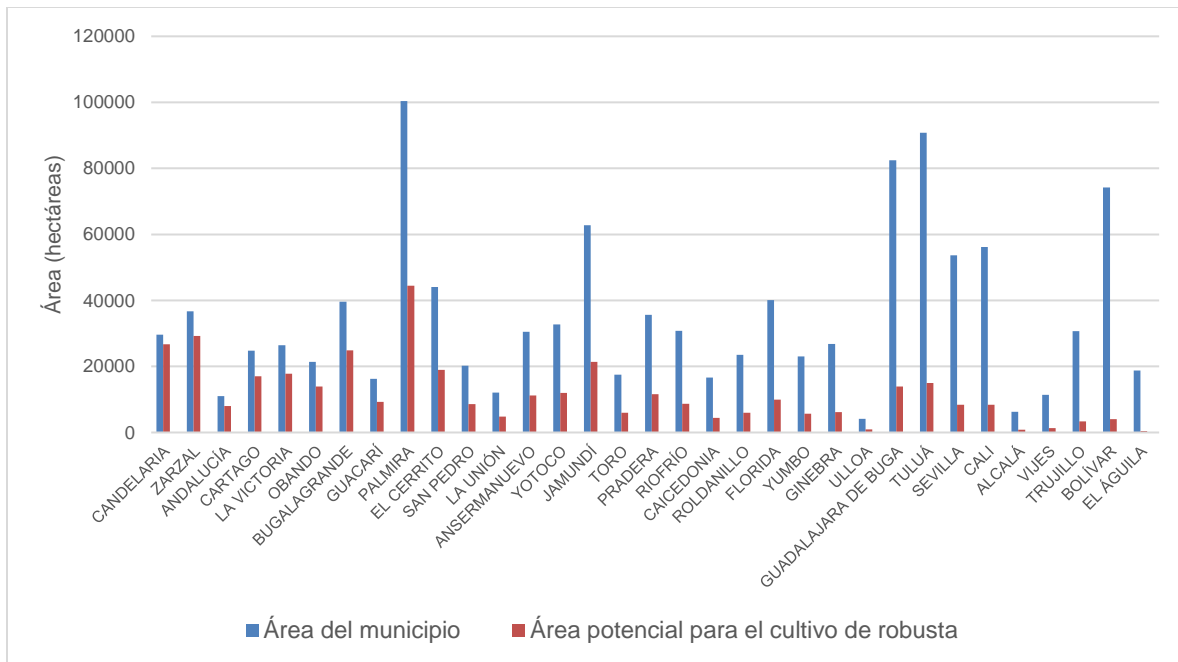


Figura 40. Áreas potenciales para la siembra de café robusta de los municipios de Candelaria, Zarzal, Andalucía, La Victoria y Cartago los municipios de análisis.

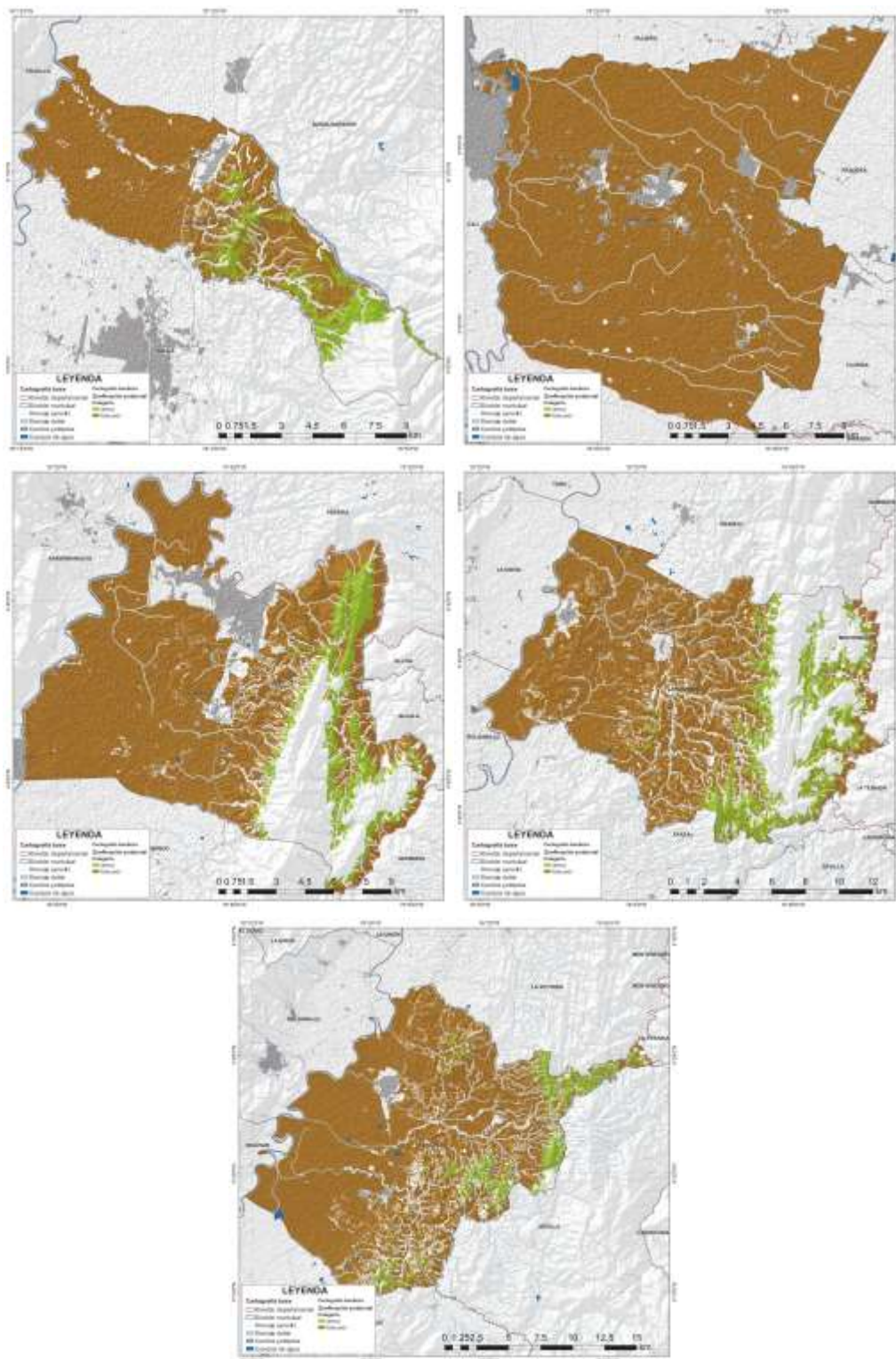


Figura 40. Áreas potenciales para la siembra de café robusta de los municipios de Candelaria, Zarzal, Andalucía, La Victoria y Cartago.

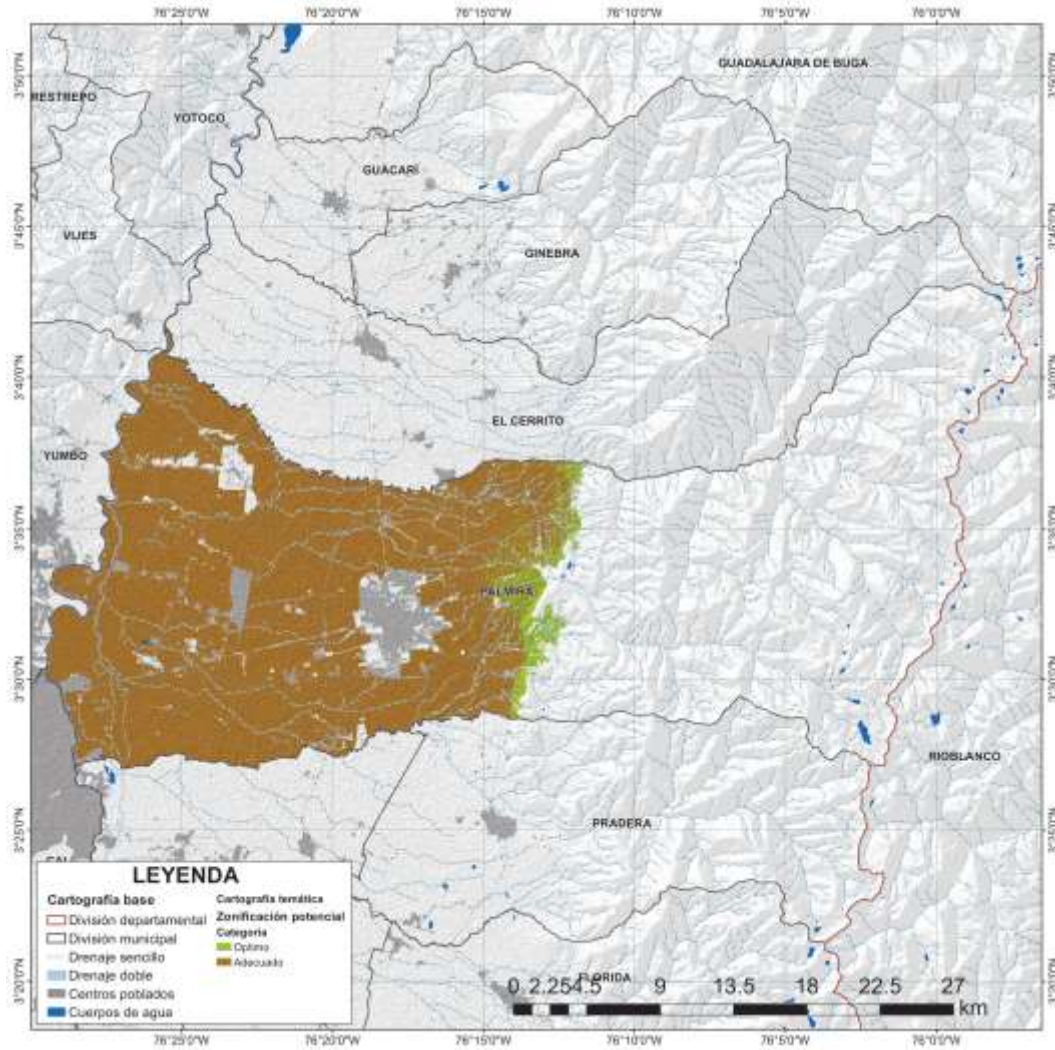


Figura 41. Zonificación potencial en el municipio de Palmira

Tabla 21. Zonificación potencial en el municipio de Palmira

Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Palmira	42502.2	1926.8	44429

## 9. Conclusiones

- Se desarrolló la metodología de zonificación potencial a escala 1:25.000 a partir del análisis multicriterio de elementos, asignando puntajes o calificaciones a cada alternativa en función de su desempeño en cada criterio, utilizando como criterios las variables de clima (temperatura media, radiación solar, temperatura mínima, temperatura máxima, precipitación anual, y humedad relativa), topografía (Altitud, pendiente) y variables del suelo (pH, contenido de materia orgánica, capacidad catiónica, contenido de fósforo, calcio, magnesio y potasio y porcentaje de arena)
- Se extrajo del resultado de la zonificación, las áreas que, por sus restricciones ambientales y vocación de uso, no se puede utilizar el suelo para prácticas agrícolas como son las fajas forestales protectoras de cauces, bosques naturales, áreas reconocidas por el SINAP o por la CVC de protección ambiental, cuerpos de agua artificiales o naturales (ríos, lagos, lagunas o embalses)
- Se identificaron las áreas potenciales para el cultivo de café robusta, dando como resultado 337092.4 hectáreas como áreas adecuadas y 57527.2 hectáreas como áreas óptimas para el potencial cultivo de café Robusta de el departamento del Valle del Cauca para los municipios de Alcalá, Andalucía, Ansermanuevo, Bolívar, Bugalagrande, Caicedonia, Cali, Candelaria, Cartago, El Águila, El Cerrito, Florida, Ginebra, Guacarí, Guadalajara De Buga, Jamundí, La Unión, La Victoria, Obando, Palmira, Pradera, Riofrío, Roldanillo, San Pedro, Sevilla, Toro, Trujillo, Tuluá, Ulloa, Vijes, Yotoco, Yumbo y Zarzal y sus respectivas veredas, las cuales son en total 402 veredas que presentan áreas potenciales
- Se determinó que los municipios de Candelaria, Zarzal, Andalucía, La Victoria y Cartago, presentan el mayor porcentaje de densidad del total del municipio como potencial para el cultivo de café Robusta.
- Se identificó que el municipio de Palmira, presenta 44429 hectáreas de área potencial para el cultivo de café robusta, siendo el municipio con mayor área potencial
- Se validaron las áreas identificadas a partir del mapa de coberturas de la tierra de la CVC, evidenciando que, las principales coberturas actuales en el área potencial son cultivos permanentes herbáceos (203889 hectáreas), pastos limpios (86898 hectáreas), arbustal (16423 hectáreas) pastos arbolados (14155 hectáreas) y cereales (10901 hectáreas).

## 10. Recomendaciones

- Zonificación por Gradiente de Potencial Agronómico y Disponibilidad de Recursos. Se recomienda definir subzonas dentro de las áreas potenciales y óptimas: Dividir las 337,092.4 hectáreas de áreas potenciales y 57,527.2 hectáreas óptimas en subzonas basadas en gradientes de idoneidad (alta, media, baja) y factores como el acceso a fuentes de agua y caminos. Esto permitirá priorizar las inversiones en infraestructura y promover un manejo agronómico adaptado a las condiciones de cada zona.

Se recomienda además, destinar las áreas óptimas a cultivos intensivos de café robusta: En las áreas óptimas (identificadas por condiciones ideales de clima, suelo y topografía), enfocar el establecimiento de sistemas productivos robustos y sostenibles, que maximizan el rendimiento del café robusta y optimizan el uso de insumos.

- Protección y Reconversión de Áreas con Vocación Forestal o de Coberturas Sensibles.

Se debe respetar zonas de exclusión agrícola y reconversión de coberturas sensibles: Asegurarse de que las fajas forestales, áreas del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP) y cuerpos de agua, se mantengan fuera del uso agrícola. Además, promover la reconversión de coberturas de baja productividad (como pastos limpios o arbustales) en áreas cercanas a las zonas de exclusión para actividades de conservación, diversificación de cultivos o agroforestería, como también incentivar la restauración ecológica en áreas menos aptas: Para mantener un equilibrio entre la producción y la conservación, estas zonas menos productivas, especialmente en áreas de arbustal y pastos arbolados, podrían destinarse a proyectos de restauración o sistemas agroforestales que beneficien a la biodiversidad y mejoren la resiliencia de los cultivos.

- Enfoque en Municipios Clave para el Escalamiento Productivo.

Se recomienda priorizar el desarrollo en municipios con alta densidad de áreas aptas: En municipios como Candelaria, Zarzal, Andalucía, La Victoria y Cartago, que presentan un alto porcentaje de áreas adecuadas, promover infraestructura, asistencia técnica y alianzas comerciales para fortalecer la producción de café robusta. Adicionalmente, se recomienda también impulsar a Palmira como centro de producción y desarrollo para café robusta: Con 44,429 hectáreas de área potencial, Palmira podría convertirse en un núcleo de producción de café robusta en el Valle del Cauca. Aquí se podrían centralizar investigaciones agronómicas y proyectos piloto de producción sustentable, así como el desarrollo de cadenas de valor y comercialización local e internacional.

---

## Referencias bibliográficas

- Aceves Navarro, L. A., Rivera Hernández, B., López Castañeda, A., Palma López, D. J., González Mancillas, R., & Juárez López, J. F. (2018). Áreas potenciales y vulnerabilidad del cultivo de café tipo robusta (*Coffea canephora* P.) al cambio climático en el estado de Tabasco, México. *Nova scientia*, 10(20), Article 20. <https://doi.org/10.21640/ns.v10i20.1379>
- Achilleos, G. A. (2011). The Inverse Distance Weighted interpolation method and error propagation mechanism – creating a DEM from an analogue topographical map. *Journal of Spatial Science*, 56(2), Article 2. <https://doi.org/10.1080/14498596.2011.623348>
- Ahmed, S., Brinkley, S., Smith, E., Sela, A., Theisen, M., Thibodeau, C., Warne, T., Anderson, E., Van Dusen, N., Giuliano, P., Ionescu, K. E., & Cash, S. B. (2021). Climate Change and Coffee Quality: Systematic Review on the Effects of Environmental and Management Variation on Secondary Metabolites and Sensory Attributes of *Coffea arabica* and *Coffea canephora*. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2021.708013>
- Andrade, G. A., Ricce, W. da S., Caramori, P. H., Zaro, G. C., & Medina, C. de C. (2012). Agroclimatic zoning of robusta coffee in the State of Paraná and impacts of climate change. *Semina: Ciências Agrárias*, 33(4), Article 4. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n4p1381>

- Arias, P. A., Ortega, G., Villegas, L. D., Martínez, J. A., Arias, P. A., Ortega, G., Villegas, L. D., & Martínez, J. A. (2021). Colombian climatology in CMIP5/CMIP6 models: Persistent biases and improvements. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 100, Article 100. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20210525>
- Busato, C., Reis, E. F. dos, Oliveira, M. G., Garcia, G. de O., Busato, C. C. M., & Partelli, F. L. (2022). Different nitrogen levels on vegetative growth and yield of conilon coffee (*Coffea canephora*). *Ciência Rural*, 52. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200770>
- Campuzano-Duque, L. F., & Blair, M. W. (2022). Strategies for Robusta Coffee (*Coffea canephora*) Improvement as a New Crop in Colombia. *Agriculture*, 12(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101576>
- Campuzano-Duque, L. F., Herrera, J. C., Ged, C., & Blair, M. W. (2021). Bases for the Establishment of Robusta Coffee (*Coffea canephora*) as a New Crop for Colombia. *Agronomy*, 11(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122550>
- Cariño, M. M., Olivas, A. L. B., Cariño, D. M., Solorio, C. A. O., Tagles, H. D., & Flores, G. C. (2023). Agroclimatic zoning of the state of Nayarit, México. *Atmósfera*, 36(1), Article 1. <https://doi.org/10.20937/ATM.53002>
- Claude, J. P. (2017). Favourable environments for *Coffea canephora* cropping in Martinique. *VertigO - La Revue Electronique en Sciences de l'Environnement*, 17(3), Article 3. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20183138292>

---

Collazos-Alarcón, E. M., Gutiérrez-Gamba, W. A., & Piñeros-Enciso, C. A. (2020).

*Estudio de viabilidad económica para la producción y comercialización de Café Robusta (Coffea Canephora) en Colombia: Caso Sabana de Torres, Santander.* <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/24562>

Colprensa. (2023, noviembre 7). *Ponerle o no un arancel del 70 % a las importaciones de café: Esta es la polémica amarga del sector cafetero colombiano.* [www.elcolombiano.com](http://www.elcolombiano.com).

<https://www.elcolombiano.com/negocios/polemica-por-propuesta-de-cargar-arancel-del-70-a-cafe-importado-LG23075538>

Constantino, L. M., Gil, Z. N., Montoya, E. C., & Benavides, P. (2021). Coffee Berry Borer (*Hypothenemus hampei*) Emergence from Ground Fruits Across Varying Altitudes and Climate Cycles, and the Effect on Coffee Tree Infestation. *Neotropical Entomology*, 50(3), Article 3.

<https://doi.org/10.1007/s13744-021-00863-5>

CVC, CIAT. (2018). *Plan Integral de Cambio Climático para el Valle del Cauca PICC.* <https://portal-hidroclimatologico.cvc.gov.co/cambio-climatico/cambio-climatico/plan-integral-de-cambio-climatico-para-el-valle-del-cauca-picc>

DANE. (2022). *Historicos Importaciones.*

<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/comercio-internacional/importaciones/importaciones-historicos>

de Carvalho Alves, M., da Silva, F. M., Sanches, L., de Carvalho, L. G., & e Silva Ferraz, G. A. (2013). Geospatial analysis of ecological vulnerability of

- coffee agroecosystems in Brazil. *Applied Geomatics*, 5(2), Article 2.  
<https://doi.org/10.1007/s12518-013-0101-0>
- Echavarría, J. J., Esguerra, P., McAllister, D., & Felipe, C. (2014). *Informe de la misión de estudios para la competitividad de la caficultura en Colombia*. 184.
- Eugenio, F. C., Peluzio, T. M. de O., Pereira, A. A. B., Santos, A. R. dos, Peluzio, J. B. E., Bragança, R., Fiedler, N. C., & Paula, E. N. da S. O. de. (2014). *Zoneamento agroclimatológico do Coffea canephora para Espírito Santo mediante interpolação espacial*.  
<http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/8056>
- Fachruddin, F., Fadhil, R., Syafriandi, & Dahlan, D. (2021). Suitability analysis of scrubland for arabica and robusta coffee plants in Aceh Besar Regency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 644(1), Article 1. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/644/1/012011>
- FAO. (2014). *Catalogue of crops used in BEFS RA*. 105.
- Federación Nacional de Cafeteros. (2023). *Café del Valle del Cauca*. *Café del Valle del Cauca*. <https://valle.federaciondecafeteros.org/cafe-de-cauca/>
- Filete, C. A., Moreira, T. R., dos Santos, A. R., dos Santos Gomes, W., Guarçoni, R. C., Moreli, A. P., Augusto, M. I., de Oliveira Abreu, R., Simmer, M. M. B., Caliman, A. D. C., Guimarães, C. V., da Silva Berilli, S., Ferrão, M. A. G., da Fonseca, A. F. A., Partelli, F. L., Berilli, A. P. C. G., da Silva Oliveira, E. C., & Pereira, L. L. (2022). The New Standpoints for the Terroir of *Coffea*

- canephora from Southwestern Brazil: Edaphic and Sensorial Perspective. *Agronomy*, 12(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/agronomy12081931>
- Flórez, C. P., Quiroga-Cardona, J., & Arias, J. C. (2021). *Variedades del Café*. Cenicafé. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/4278>
- FNC. (2022). *Coffee Statistics*. Federación Nacional de Cafeteros. <https://federaciondefcafeteros.org/wp/coffee-statistics/?lang=en>
- González González, H. A., & Hernández Santana, J. R. (2016). Zonificación agroecológica del Coffea arabica en el municipio Atoyac de Álvarez, Guerrero, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 2016(90), Article 90. <https://doi.org/10.14350/rig.49329>
- González, J. A. C., Durán, R. Q., Aguas, J. S. T., Murillo, C. A. O., Echeverri, C. H. I., & Kafure, J. I. V. (2011). *Zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca (cuarta aproximación)*. *Principios metodológicos y aplicaciones*. 119.
- González-Orozco, C. E., Porcel, M., Byrareddy, V. M., Rahn, E., Cardona, W. A., Velandia, D. A. S., Araujo-Carrillo, G. A., & Kath, J. (2024). Preparing Colombian coffee production for climate change: Integrated spatial modelling to identify potential robusta coffee (*Coffea canephora* P.) growing areas. *Climatic Change*, 177(4), 67. <https://doi.org/10.1007/s10584-024-03717-2>
- Grajales-Quintero, A., Serrano, E. D., & Von-H, C. M. H. (2013). *LOS MÉTODOS Y PROCESOS MULTICRITERIO PARA LA EVALUACIÓN*. 36.

- Läderach, P., Ramirez–Villegas, J., Navarro-Racines, C., Zelaya, C., Martinez–Valle, A., & Jarvis, A. (2017). Climate change adaptation of coffee production in space and time. *Climatic Change*, *141*(1), Article 1.  
<https://doi.org/10.1007/s10584-016-1788-9>
- Lambot, C., Herrera, J. C., Bertrand, B., Sadeghian, S., Benavides, P., & Gaitán, A. (2017). Chapter 2—Cultivating Coffee Quality—Terroir and Agro-Ecosystem. En B. Folmer (Ed.), *The Craft and Science of Coffee* (pp. 17-49). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803520-7.00002-5>
- Lima, E. de P., Moraes, A. V. de C. de, & Goncalves, A. O. (2022). *Zoneamento agroclimático da cultura do café para o Estado do Rio de Janeiro. - Portal Embrapa*. <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/950790/zoneamento-agroclimatico-da-cultura-do-cafe-para-o-estado-do-rio-de-janeiro>
- Lima, J. S. de S., Costa, F. P., Xavier, A. C., Oliveira, R. B., & Silva, S. A. (2014). Spatial and temporal variability of the productivity of coffee canephora. *Coffee Science - ISSN 1984-3909*, *9*(3), Article 3.
- Melo Júnior, J. C. F. de, Faria, R. A. de, Sedyama, G. C., Ribeiro, C. A. Á. S., & Santos, F. A. A. (2001). Zoning of coffee and the change of the agricultural composition of the Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, MG - Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, *5*, 510-518.  
<https://doi.org/10.1590/S1415-43662001000300024>

- 
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2023). *Estadísticas agropecuarias*. Agronet MinAgricultura.  
<https://agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx>
- Muñoz-Rios, L. A., Vargas-Villegas, J., & Suarez, A. (2020). Local perceptions about rural abandonment drivers in the Colombian coffee region: Insights from the city of Manizales. *Land Use Policy*, *91*, 104361.  
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104361>
- Ngolo, A. O., Filho, E. I. F., Ferreira, W. P. M., & Fernandes, R. B. A. (2018). Zoneamento agroclimático para a cultura do cafeeiro em Angola. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 19-28.
- Ocampo López, O. L. (2012). *Análisis de vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná para condiciones estacionarias y de cambio climático*.  
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9268>
- Ocampo López, O. L., Castañeda Peláez, K., & Vélez Upegui, J. J. (2017). Caracterización de los ecotopos cafeteros colombianos en el Triángulo del Café. *Perspectiva Geográfica*, *22*(1), Article 1.  
<https://doi.org/10.19053/01233769.6100>
- Patiño-González, M. A., Sadeghian-Khalajabadi, S., & Montoya-Restrepo, E. C. (2006). CARACTERIZACIÓN DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN LA ZONA CAFETERA DEL VALLE DEL CAUCA MEDIANTE REGISTROS HISTÓRICOS. *Cenicafé*, *57*.
- PCC. (2022). *Municipios en Valle del Cauca – PCC*.  
<https://paisajeculturalcafetero.org.co/municipios-en-valle-del-cauca/>

- Perez, J., Kilian, B., Pratt, L., Ardila, J. C., Lamb, H., Byers, L., & Sanders, D. (2017). Chapter 6—Economic Sustainability—Price, Cost, and Value. En B. Folmer (Ed.), *The Craft and Science of Coffee* (pp. 133-160). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803520-7.00006-2>
- Polidori, L., & El Hage, M. (2020). Digital Elevation Model Quality Assessment Methods: A Critical Review. *Remote Sensing*, 12(21), Article 21. <https://doi.org/10.3390/rs12213522>
- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—What it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3), 161-176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Salas López, R., Gómez Fernández, D., Silva López, J. O., Rojas Briceño, N. B., Oliva, M., Terrones Murga, R. E., Iliquin Trigos, D., Barboza Castillo, E., & Barrera Gurbillón, M. Á. (2020). Land Suitability for Coffee (*Coffea arabica*) Growing in Amazonas, Peru: Integrated Use of AHP, GIS and RS. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/ijgi9110673>
- Silva, D. F. B., Morejon-Garcia, M., Diaz-Pita, A., Almeida, F. M. de, Costa-Neta, J. F. da, & Goncalves, V. (2020). Agroclimatic characterization of the Uige province, Angola based on the development of Robusta Coffee. *Cultivos Tropicales*, 41(1), Article 1.
- Taques, R. C., & Dadalto, G. G. (2019). *Agroclimatic zoning for conilon coffee culture in the State of Espirito Santo*. <https://biblioteca.incaper.es.gov.br/digital/handle/123456789/3541>

The World Bank. (2017). *Solar resource data: Solargis*.

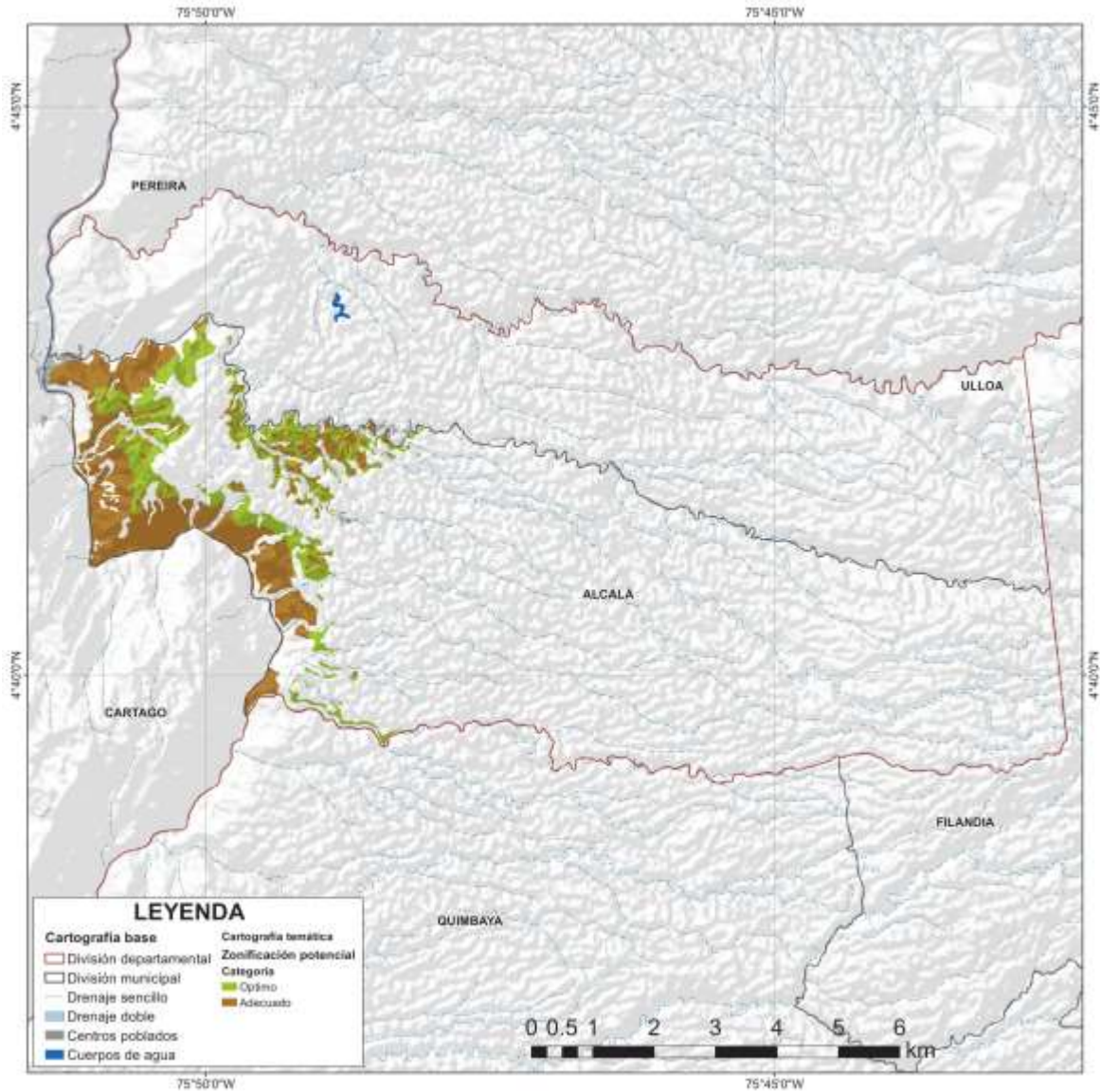
<https://solargis.com/es/docs/methodology/solar-radiation-modeling>

Villegas, Castañeda, Agudelo, Ocampo, & Ardila. (2023a). *Agroecological characterization of Coffea Canephora (robusta) development in non-traditional coffee growing regions of Caldas, Colombia*. 17.

Villegas, Castañeda, Agudelo, Ocampo, & Ardila. (2023b). *Agroecological characterization of Coffea Canephora (robusta) development in non-traditional coffee growing regions of Caldas, Colombia*. 17.

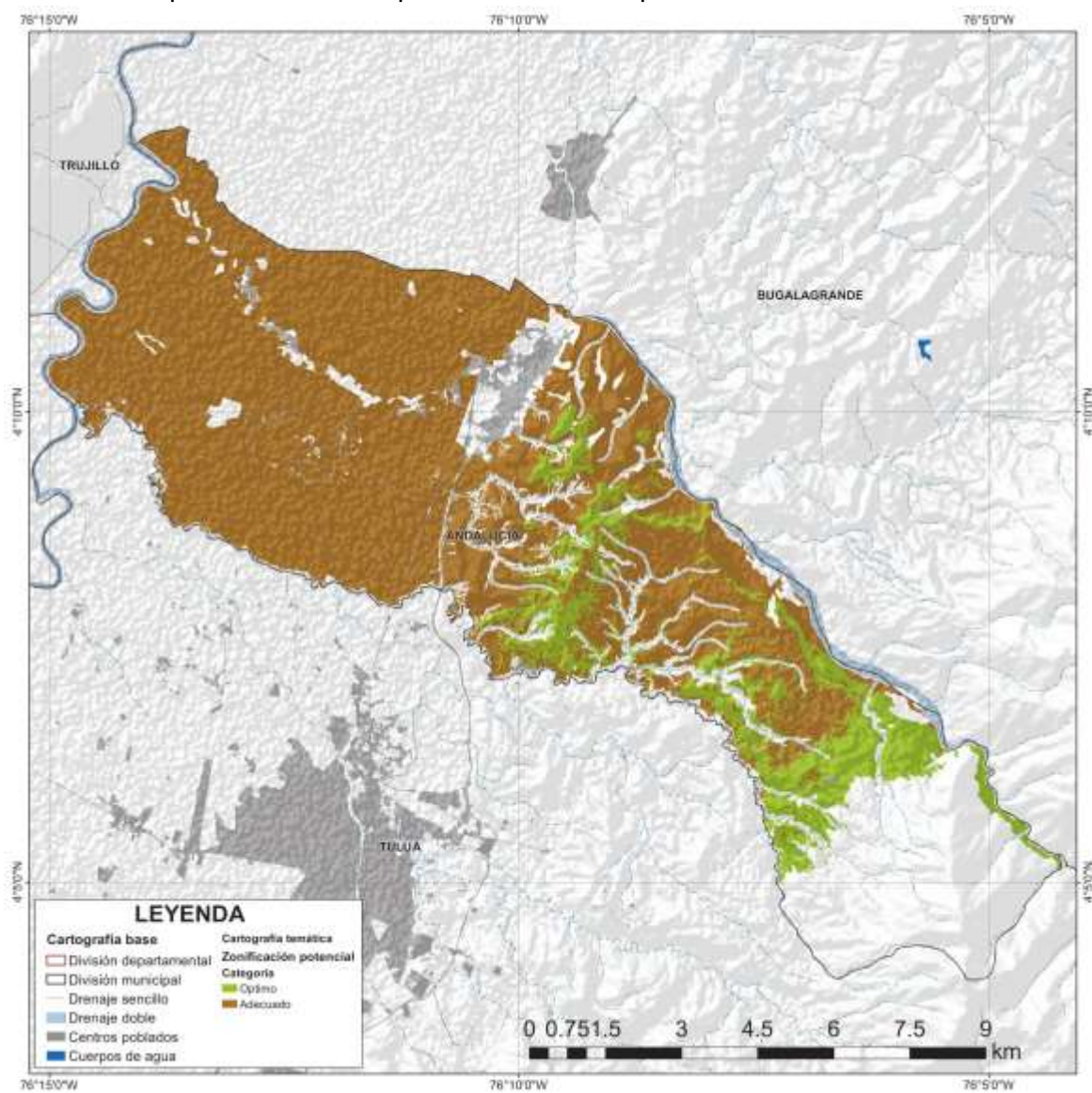
# Anexos

## Anexo A. Mapa de zonificación potencial del municipio de Alcalá.



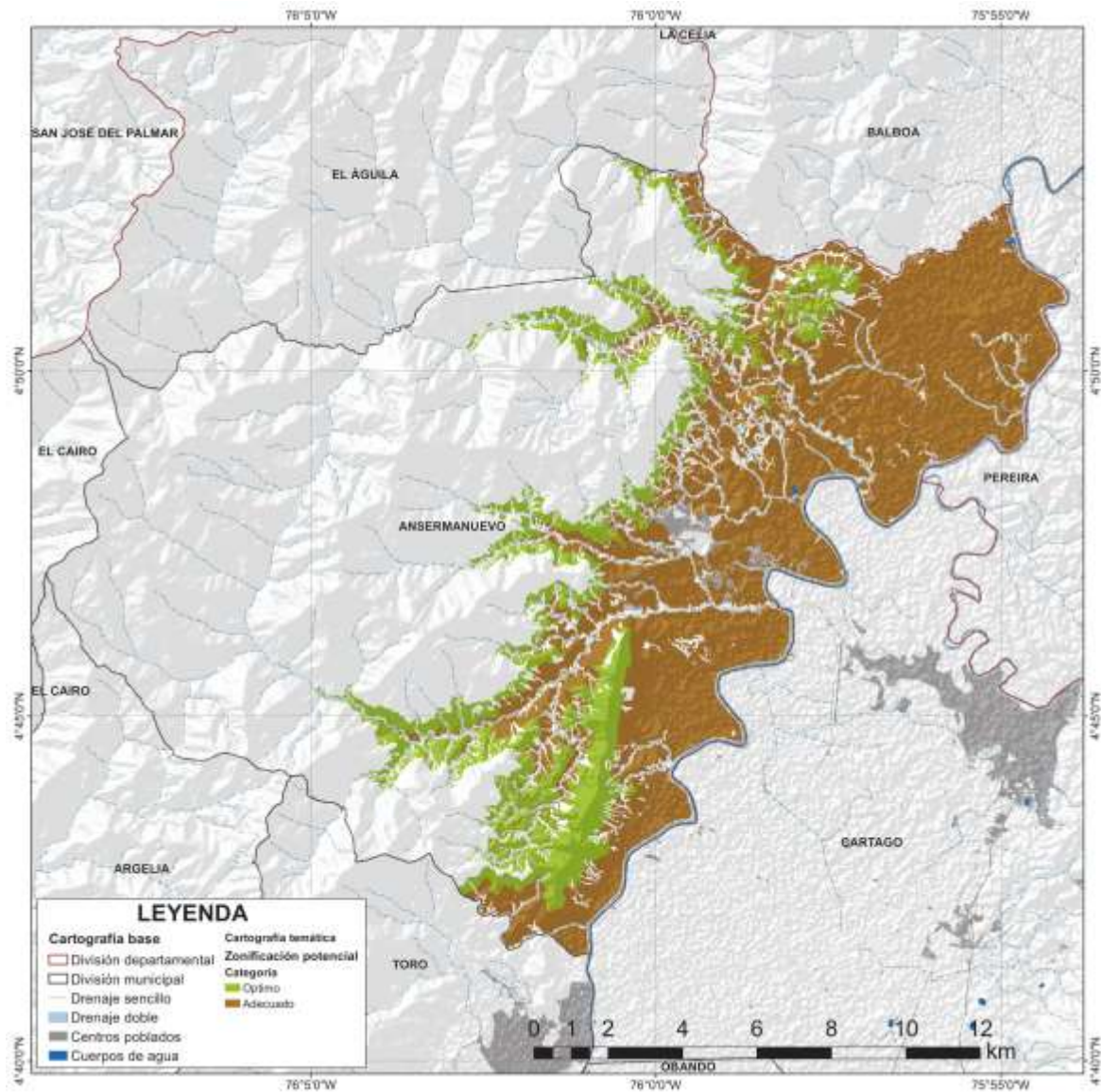
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Alcalá	545.9	321.9	867.8

### Anexo B. Mapa de zonificación potencial del municipio de Andalucía.



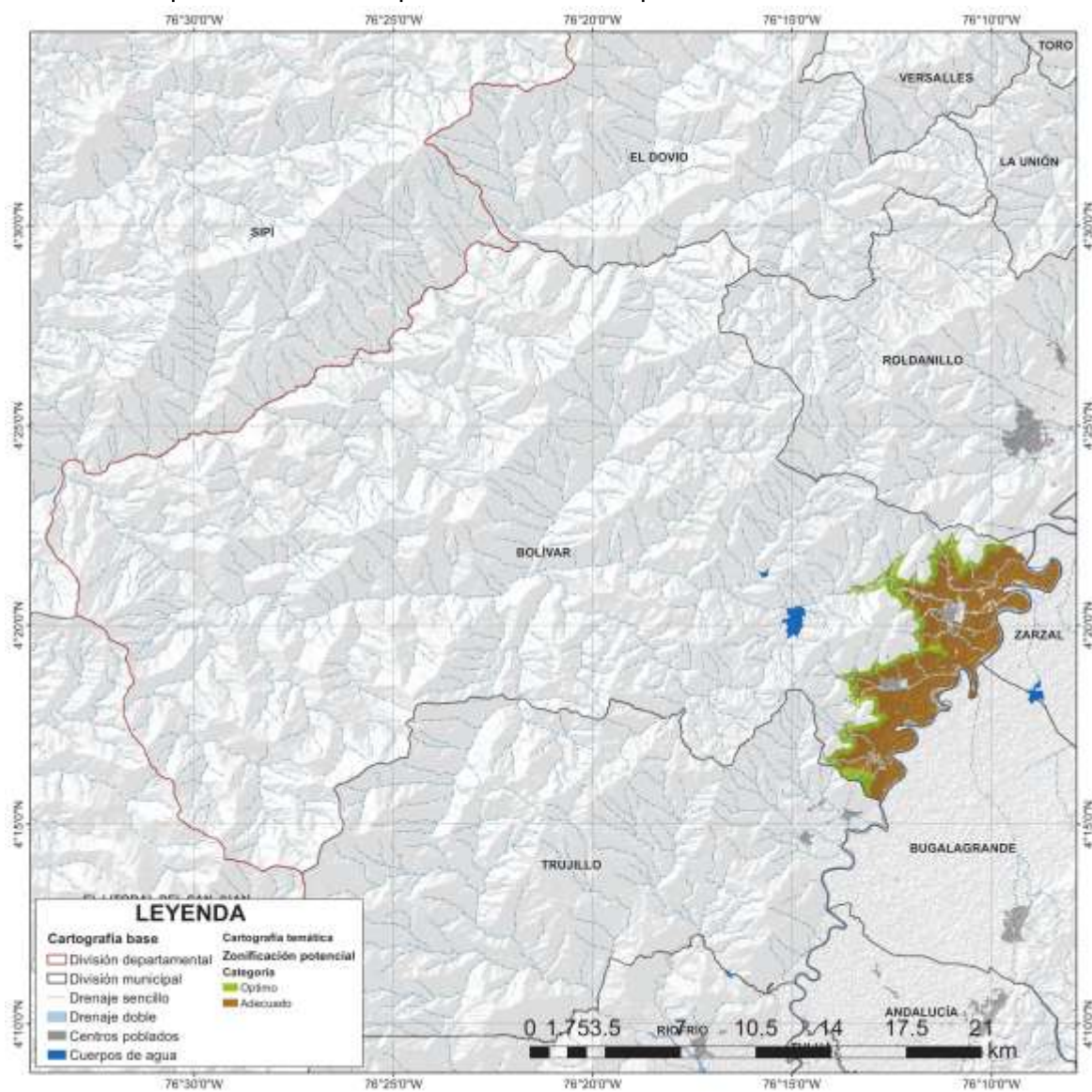
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Andalucía	6812.4	1197.1	8009.5

## Anexo C. Mapa de zonificación potencial del municipio de Ansermanuevo.



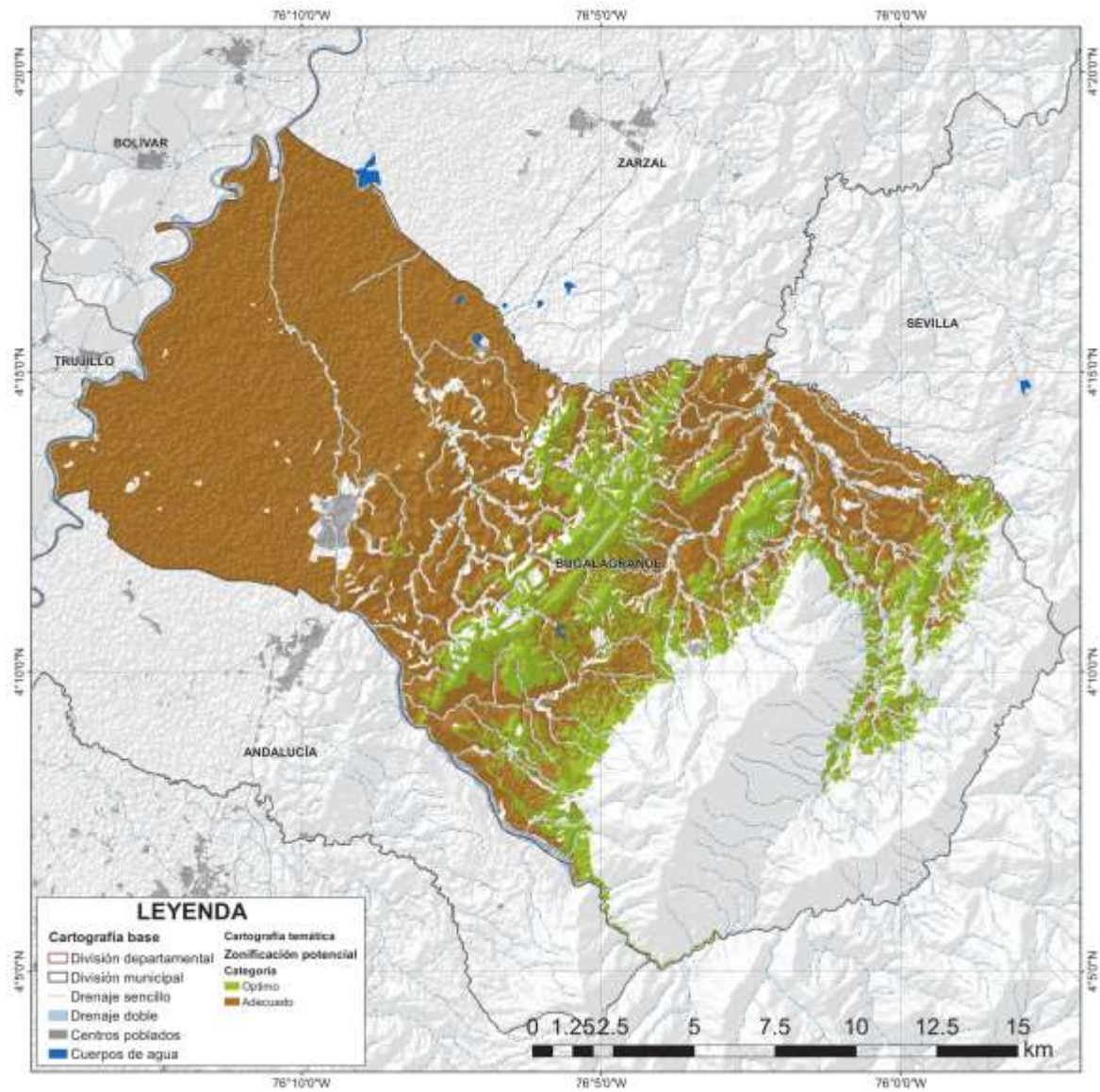
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Ansermanuevo	8396.9	2832.3	11229.2

### Anexo D. Mapa de zonificación potencial del municipio de Bolívar.



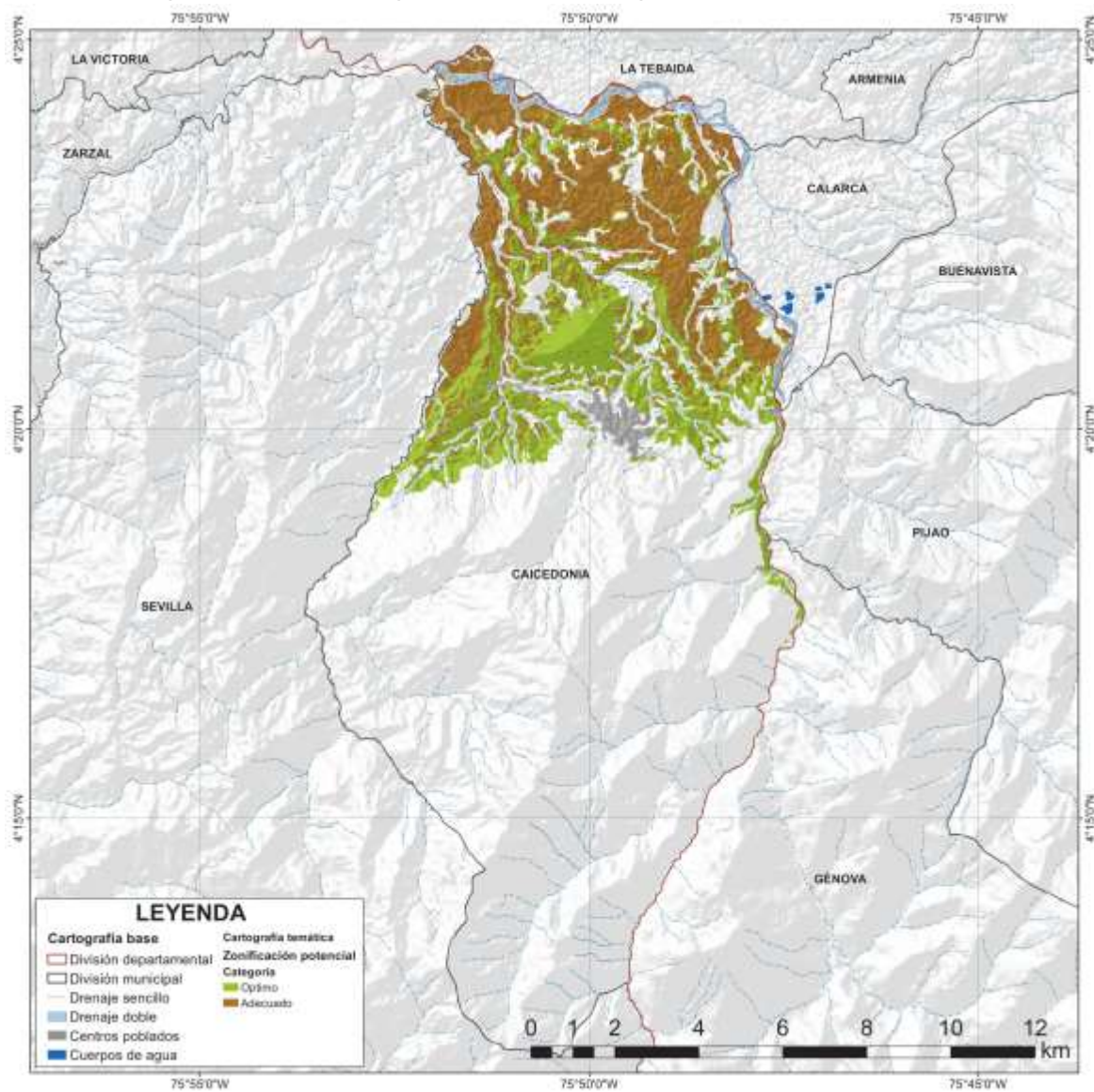
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Bolívar	3107.7	927.5	4035.2

### Anexo E. Mapa de zonificación potencial del municipio de Bugalagrande.



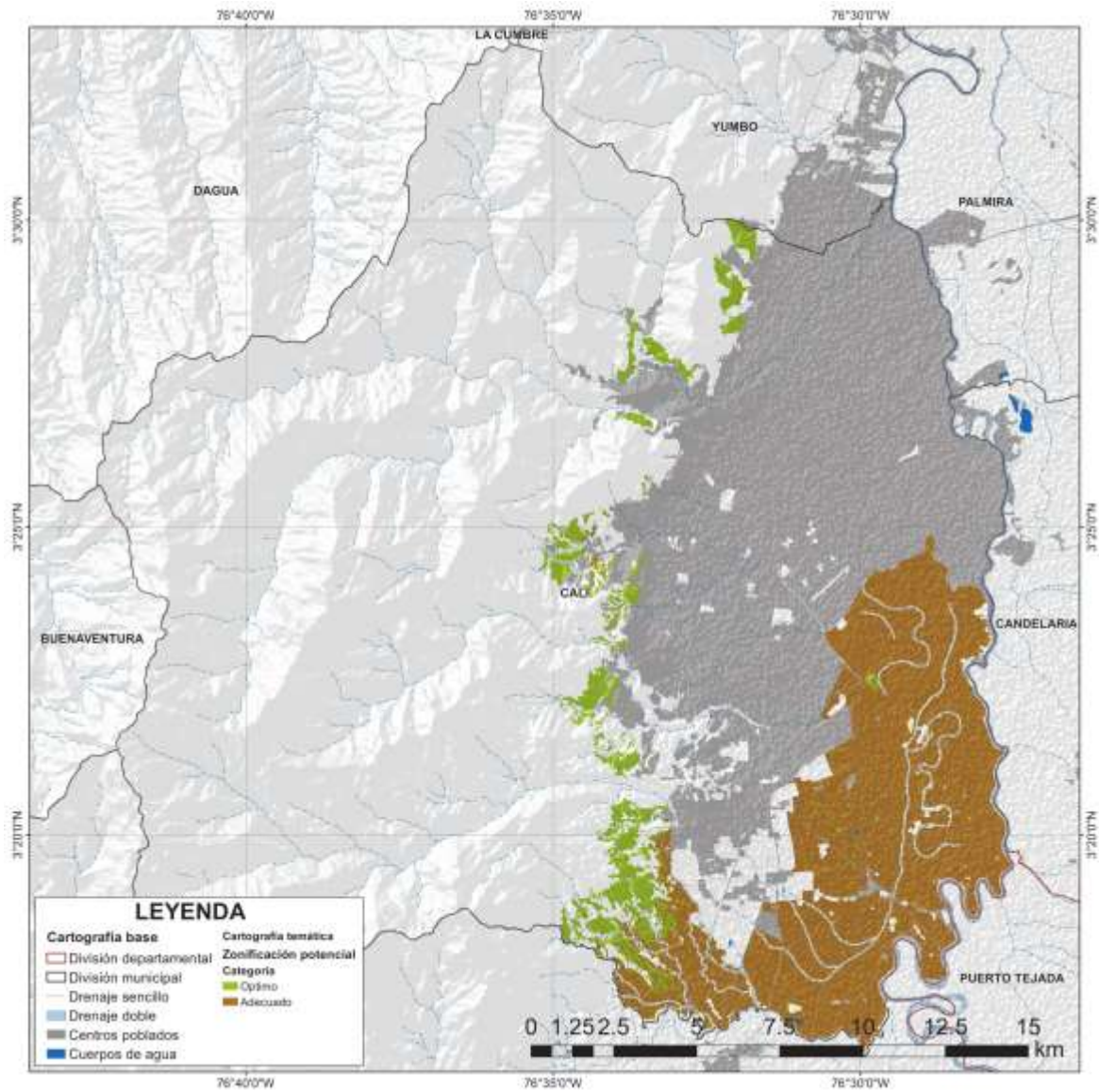
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Bugalagrande	19660.5	5178.1	24838.6

### Anexo F. Mapa de zonificación potencial del municipio de Caicedonia.



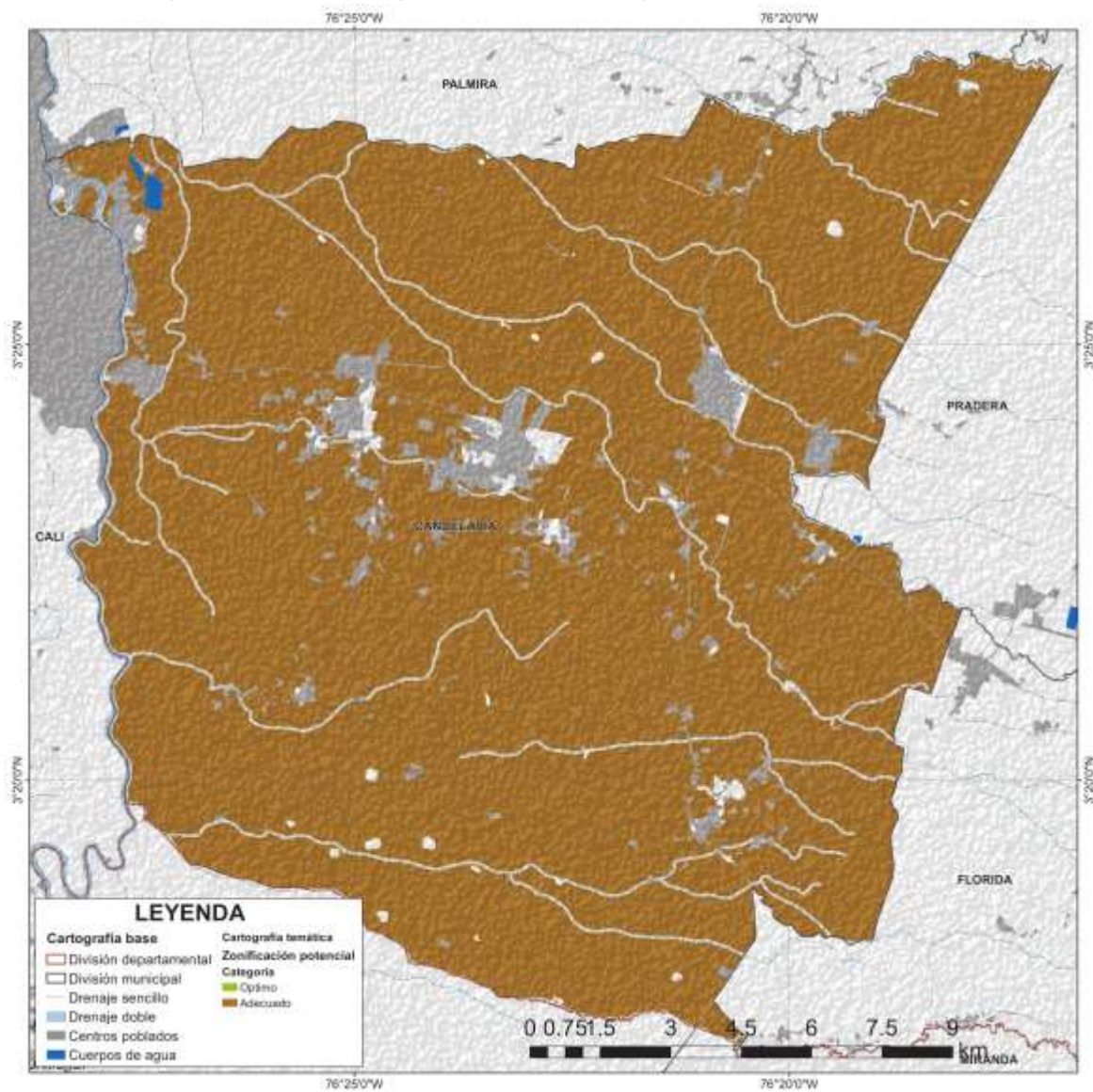
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Caicedonia	2419.4	1981.7	4401.1

**Anexo G.** Mapa de zonificación potencial del municipio de Cali.



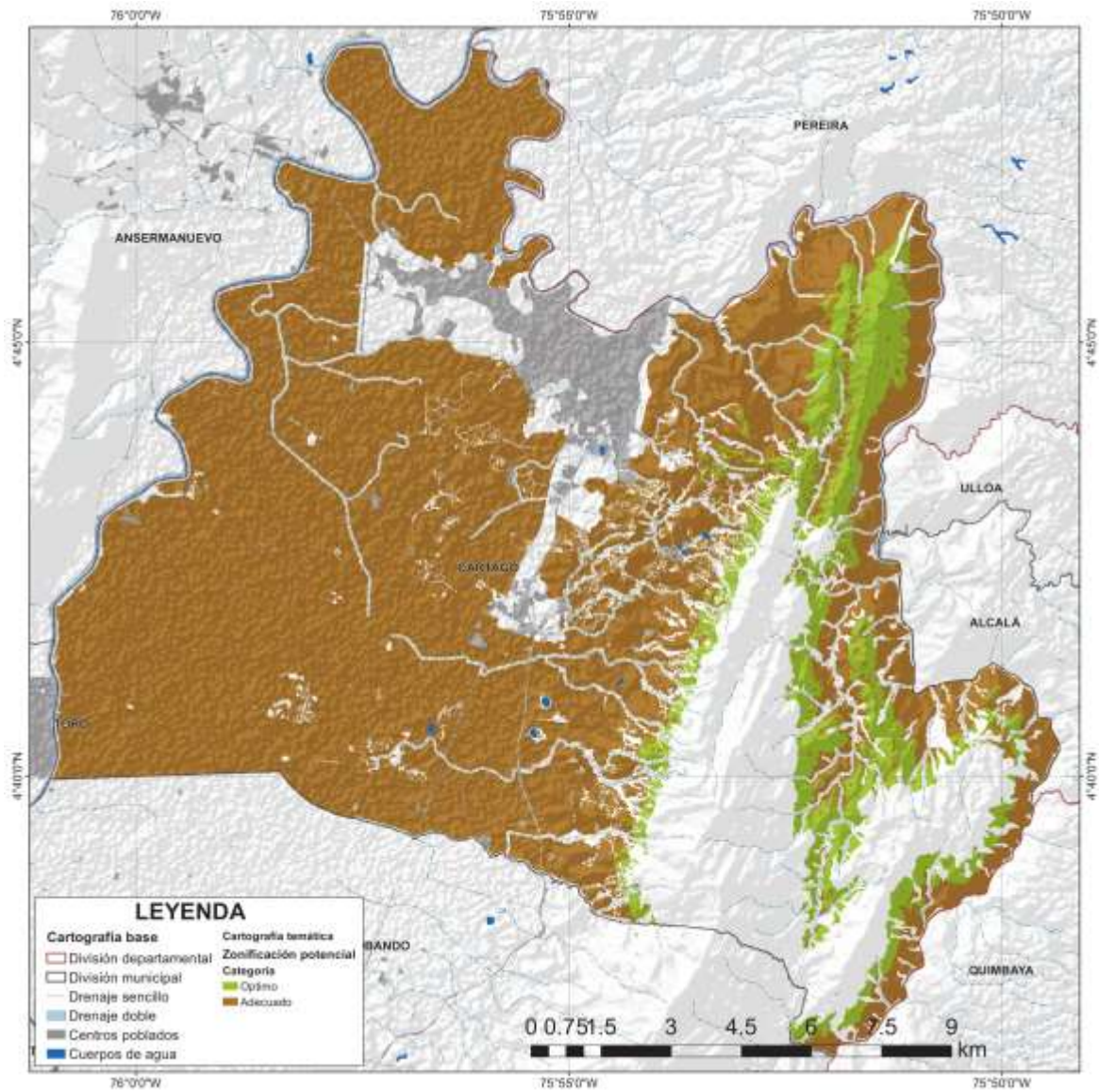
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Cali	6983.6	1378.7	8362.3

### Anexo H. Mapa de zonificación potencial del municipio de Candelaria.



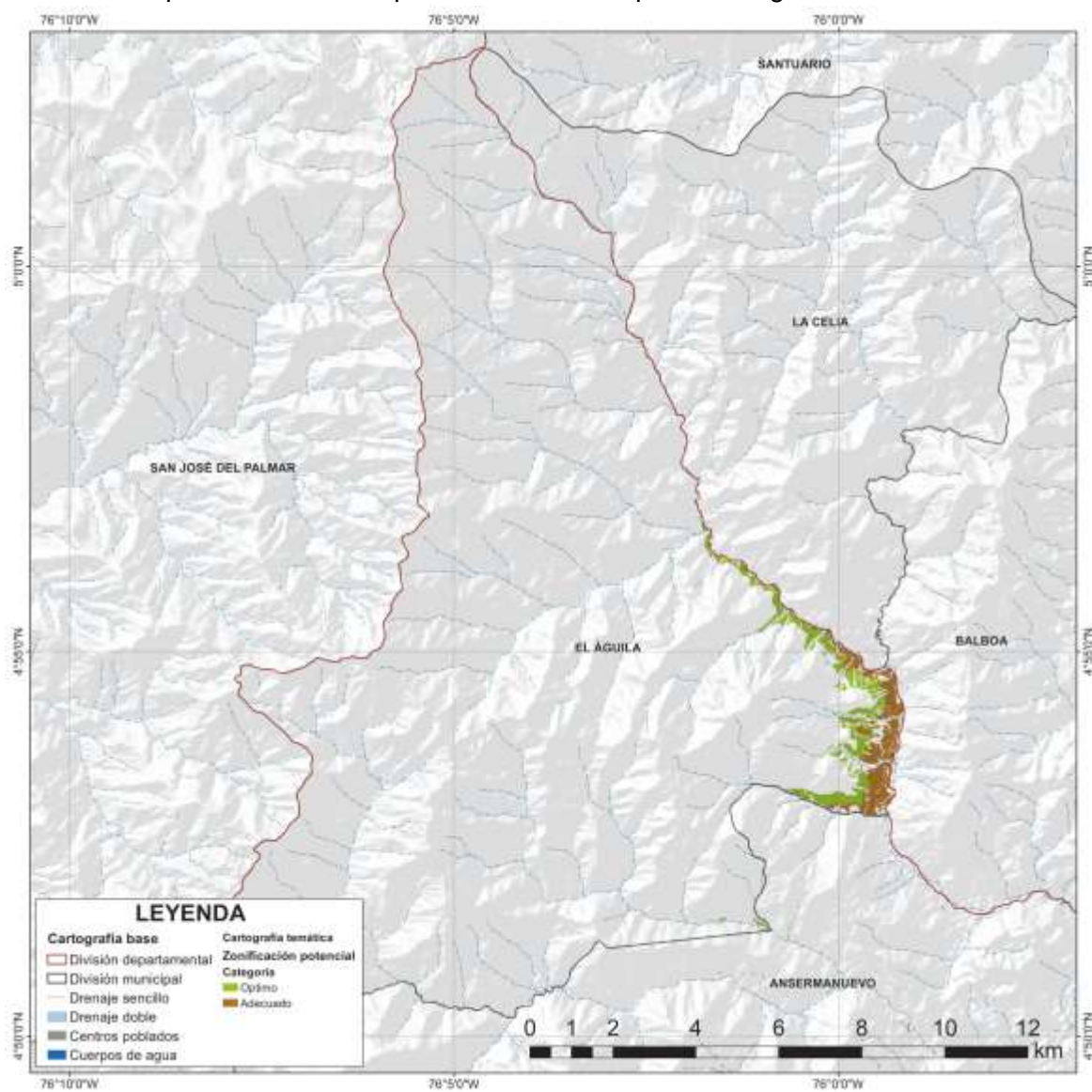
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Candelaria	26687.3	12.0	26699.4

**Anexo I. Mapa de zonificación potencial del municipio de Cartago.**



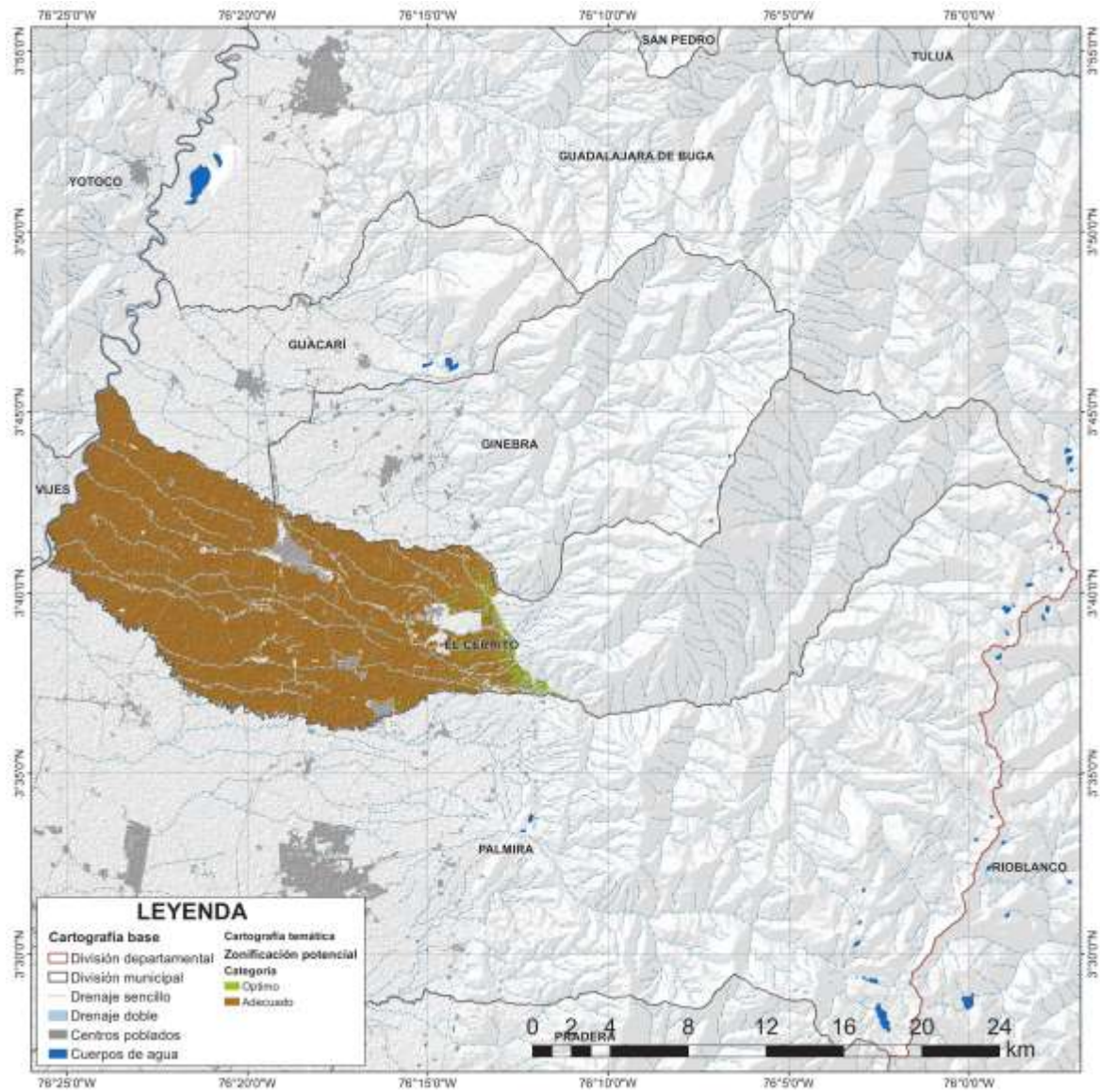
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Cartago	15190.0	1883.8	17073.8

### Anexo J. Mapa de zonificación potencial del municipio de El Águila.



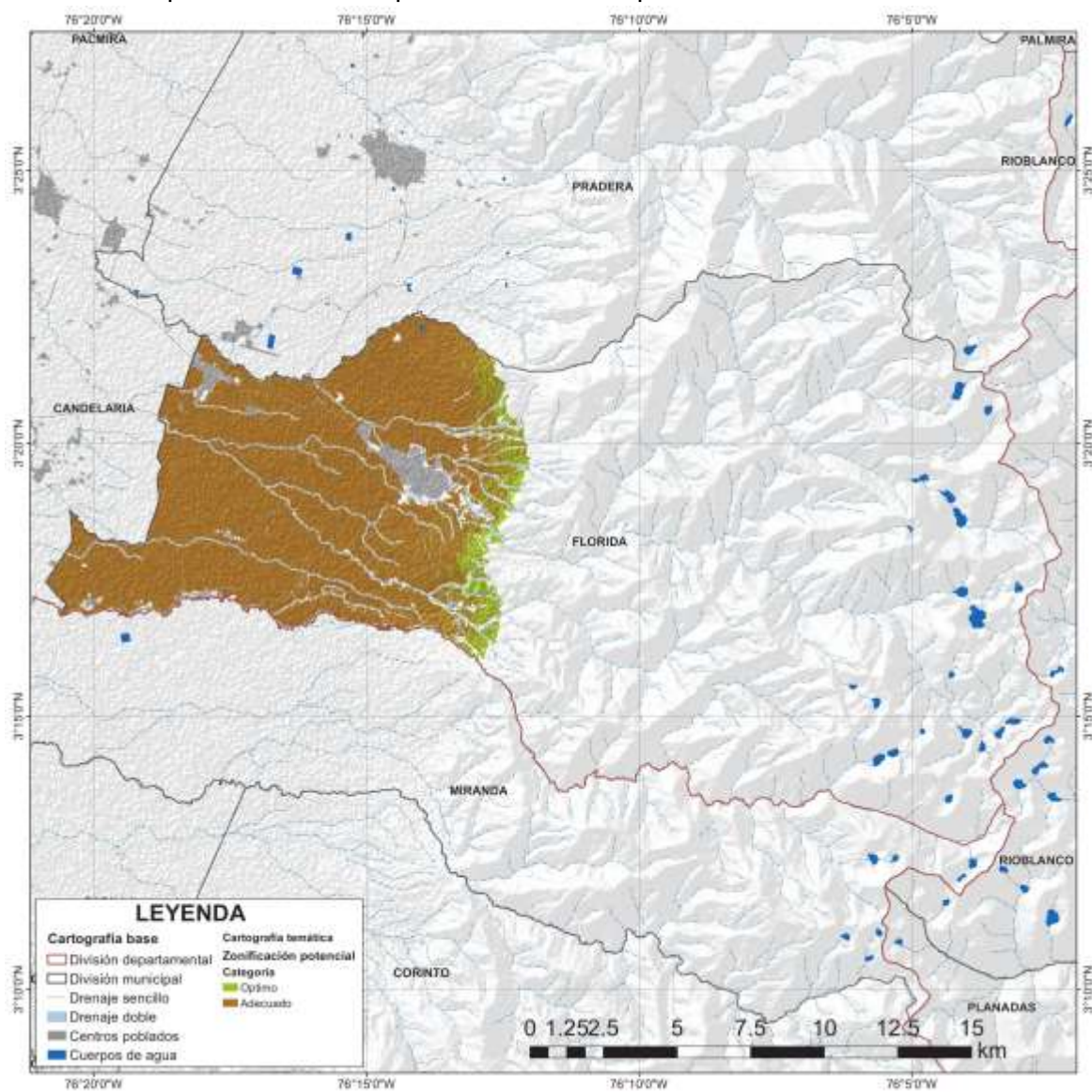
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
El Águila	188.3	219.8	408.0

**Anexo K. Mapa de zonificación potencial del municipio de El Cerrito.**



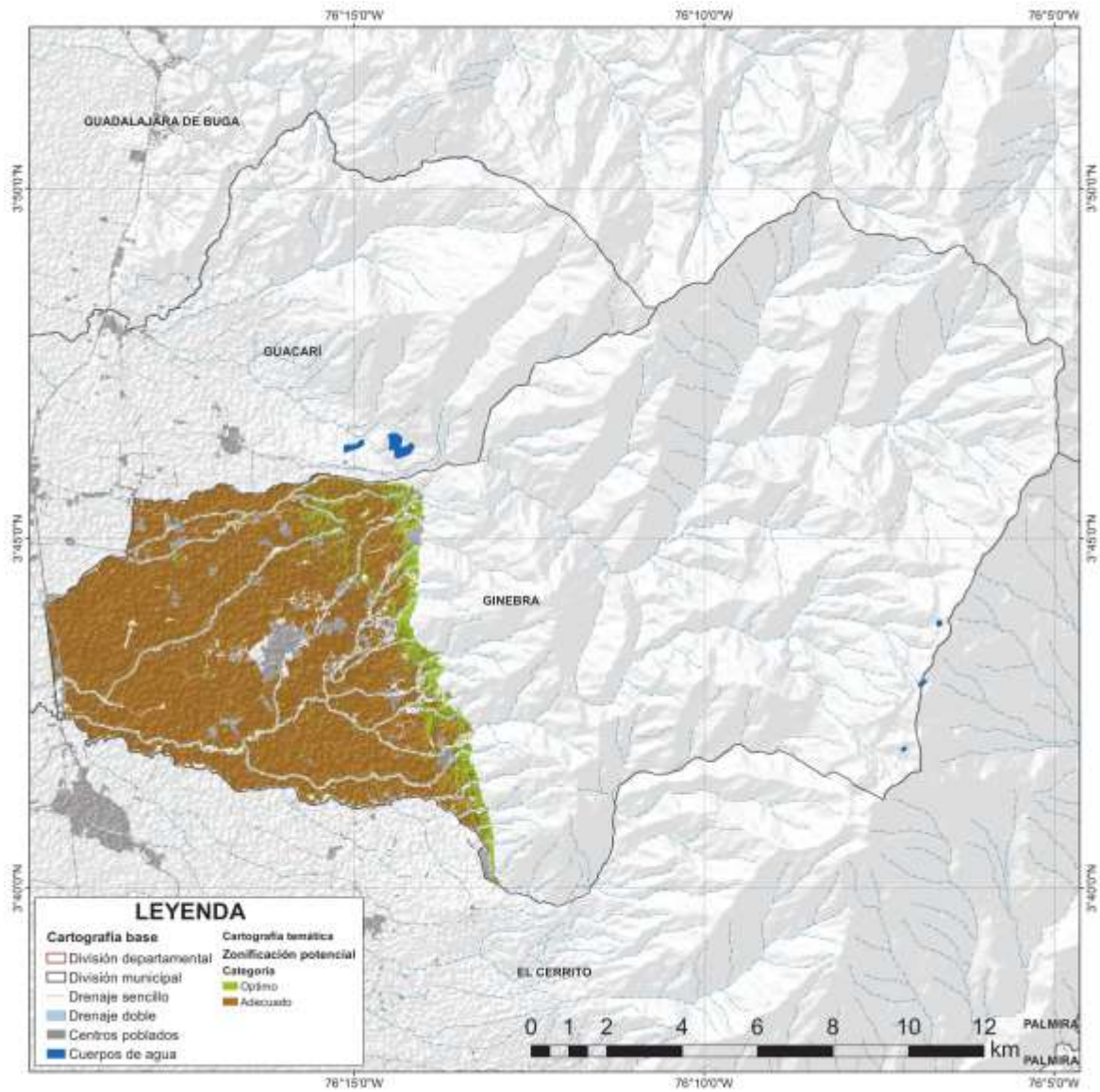
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
El Cerrito	18466.3	450.1	18916.4

### Anexo L. Mapa de zonificación potencial del municipio de Florida.



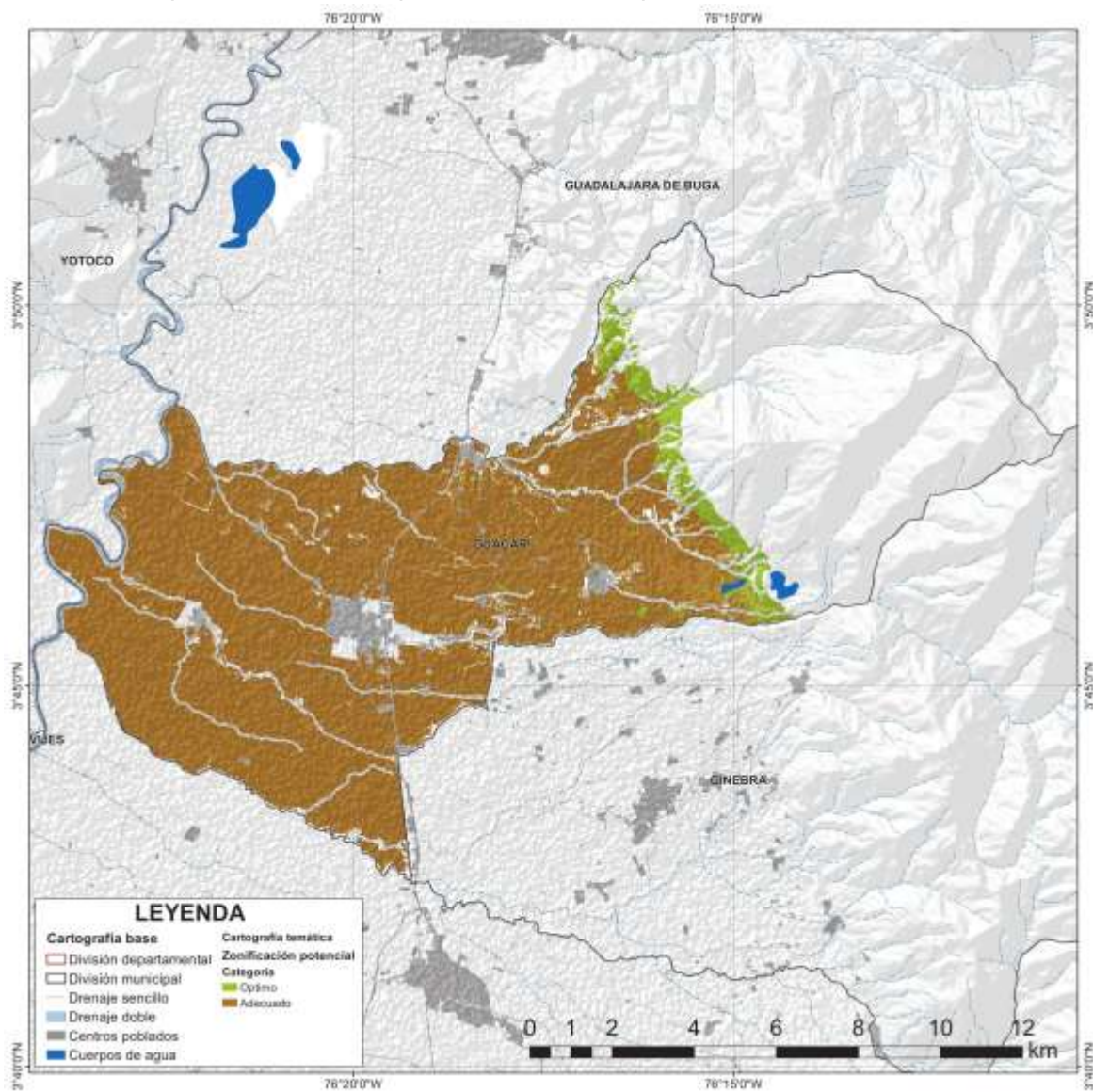
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Florida	9355.3	624.0	9979.3

**Anexo M.** Mapa de zonificación potencial del municipio de Ginebra.



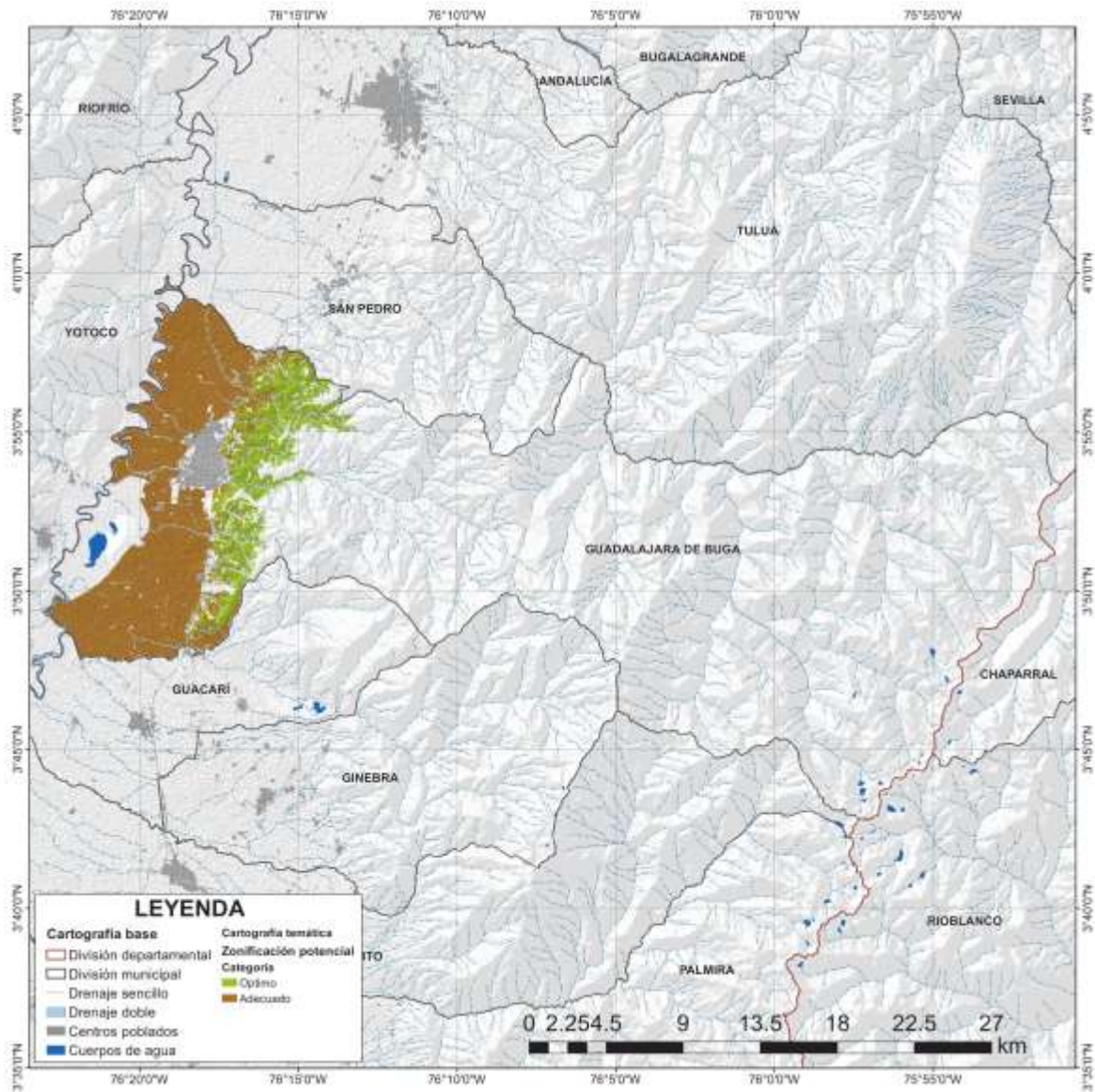
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Ginebra	5600.2	547.3	6147.5

### Anexo N. Mapa de zonificación potencial del municipio de Guacarí.



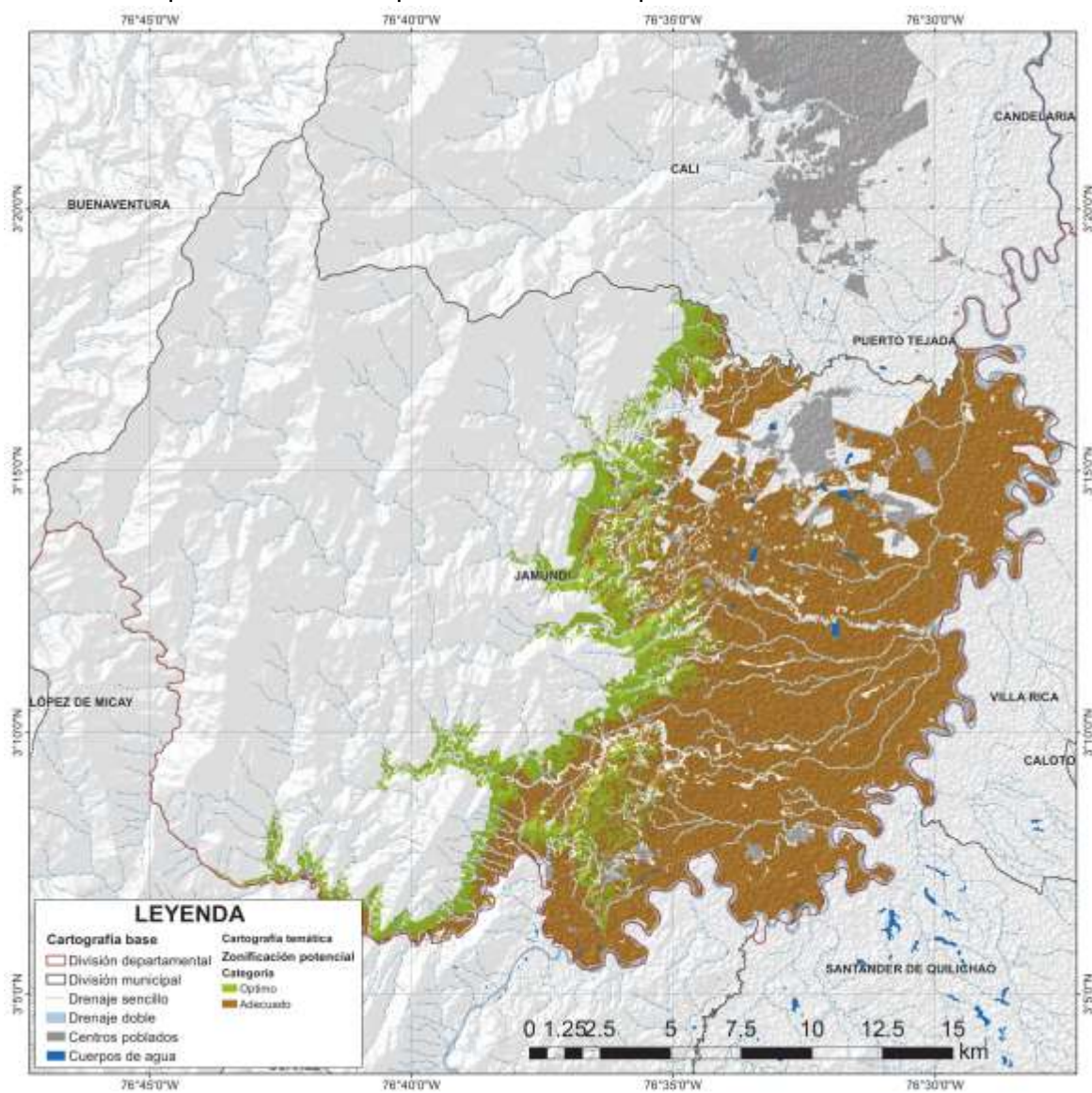
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Guacarí	8804.7	494.0	9298.6

**Anexo O.** Mapa de zonificación potencial del municipio de Guadalajara de Buga.



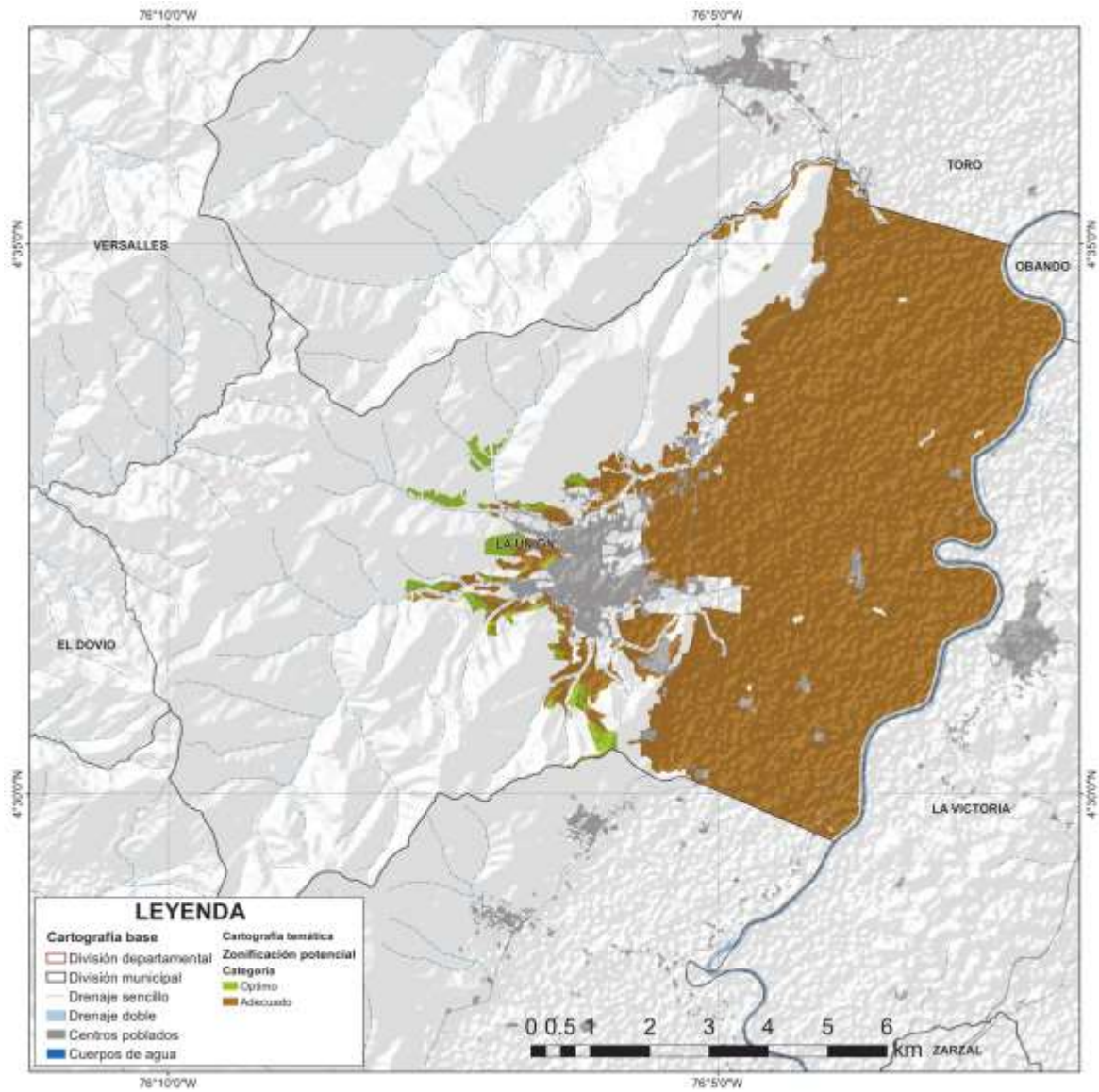
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Guadalajara De Buga	10625.5	3322.2	13947.7

### Anexo P. Mapa de zonificación potencial del municipio de Jamundí.



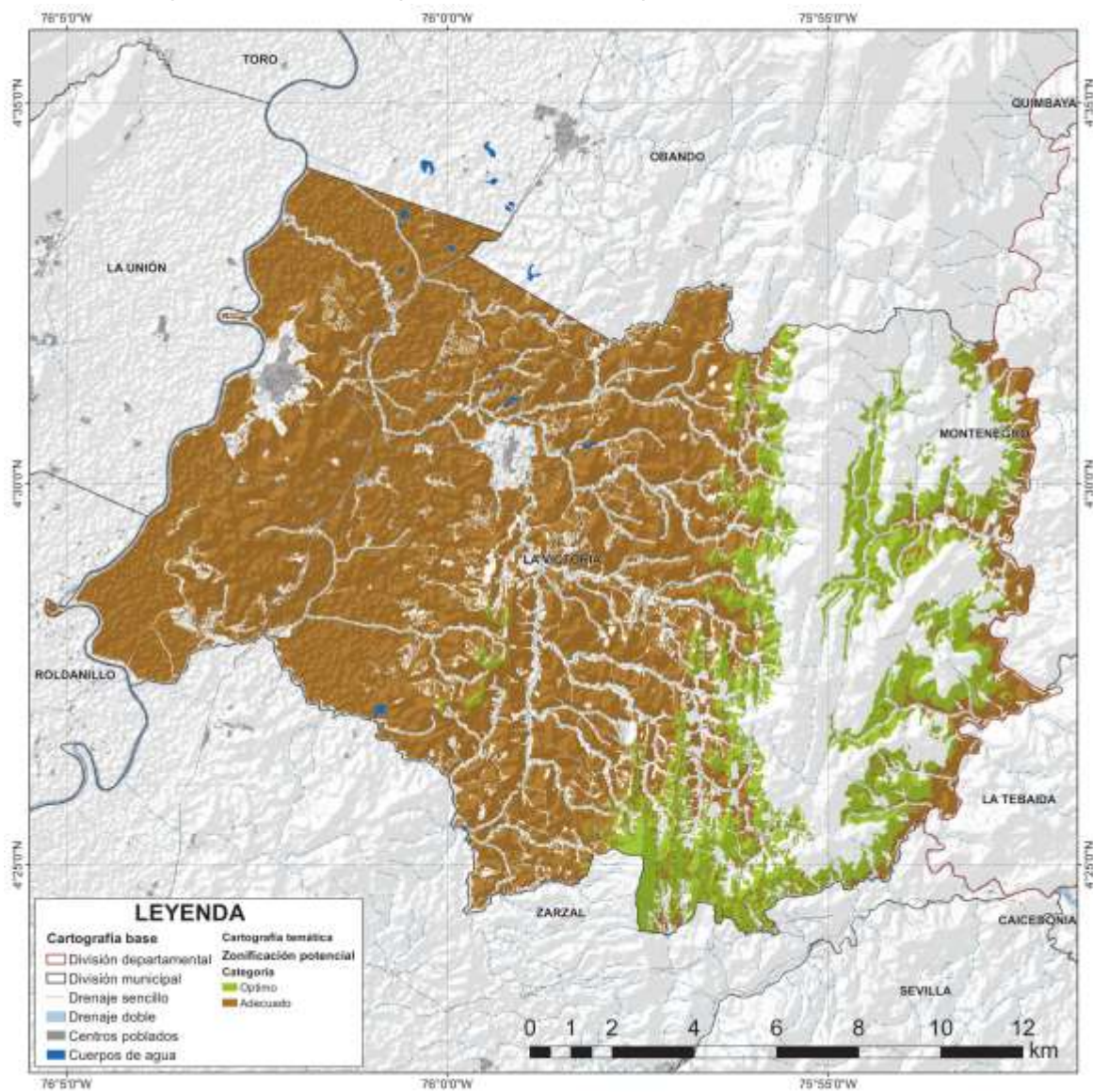
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Jamundí	17332.7	4093.4	21426.1

**Anexo Q. Mapa de zonificación potencial del municipio de La Unión.**



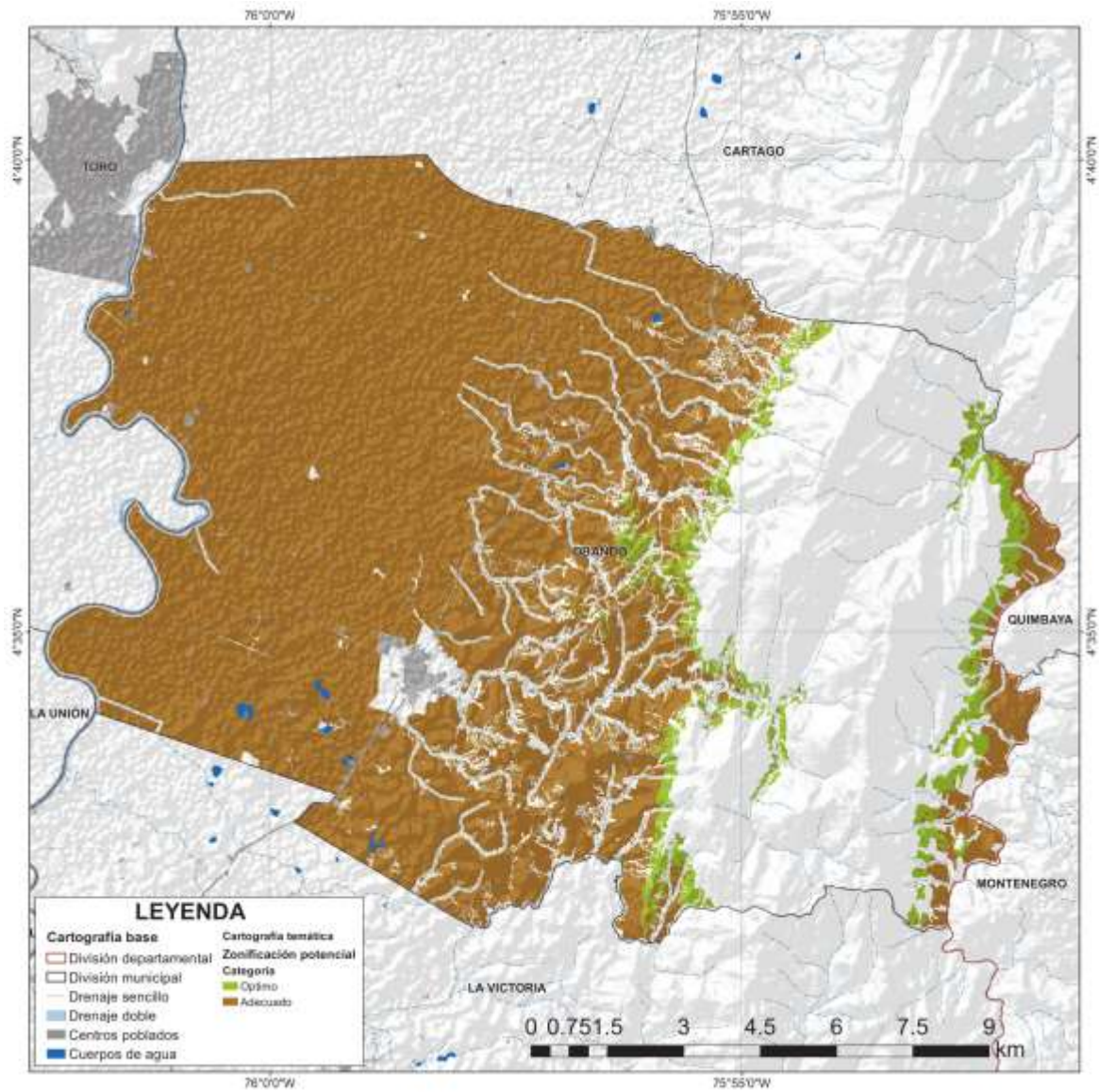
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
La Unión	4651.7	126.3	4778.0

### Anexo R. Mapa de zonificación potencial del municipio de La Victoria.



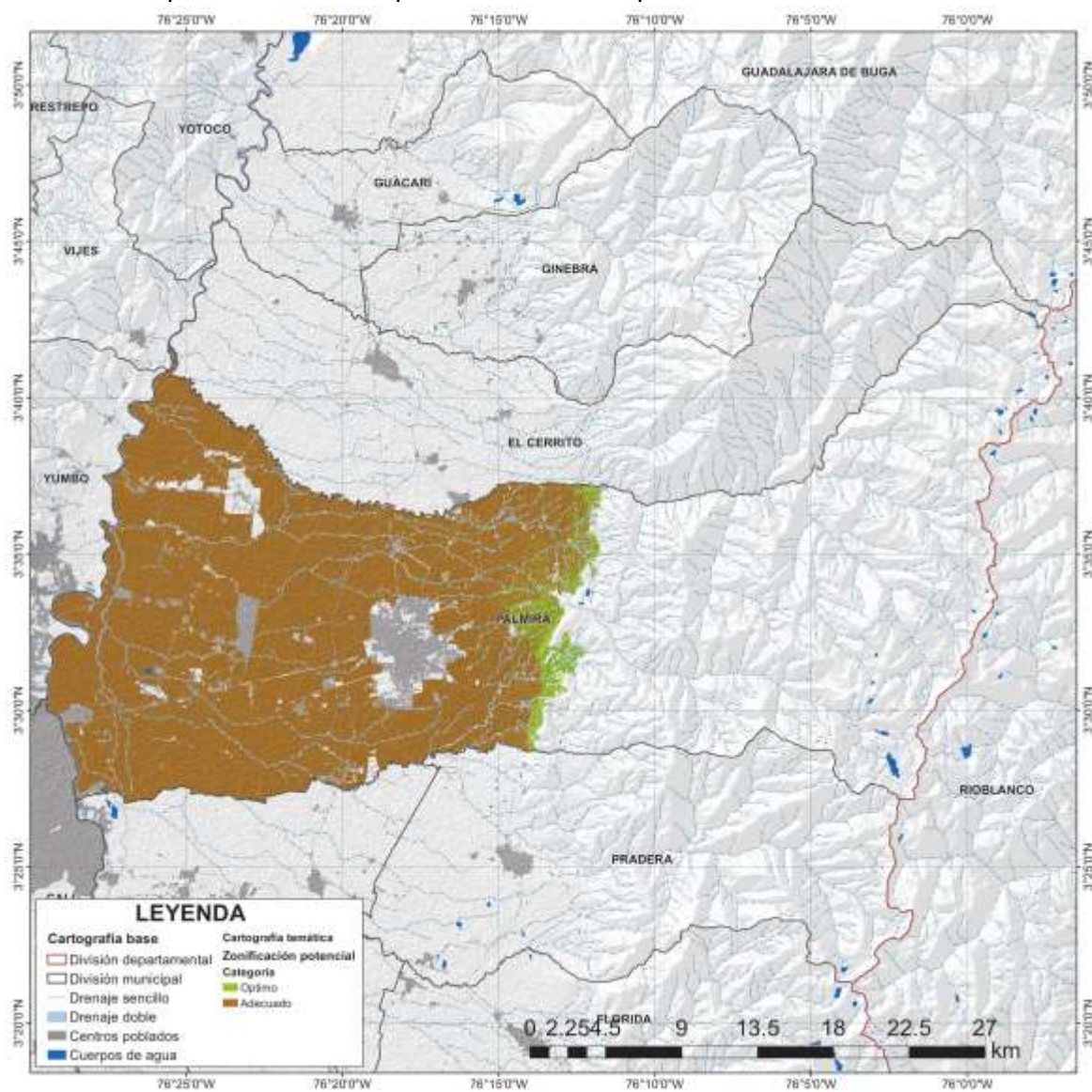
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
La Victoria	14837.9	2958.0	17795.9

**Anexo S. Mapa de zonificación potencial del municipio de Obando.**



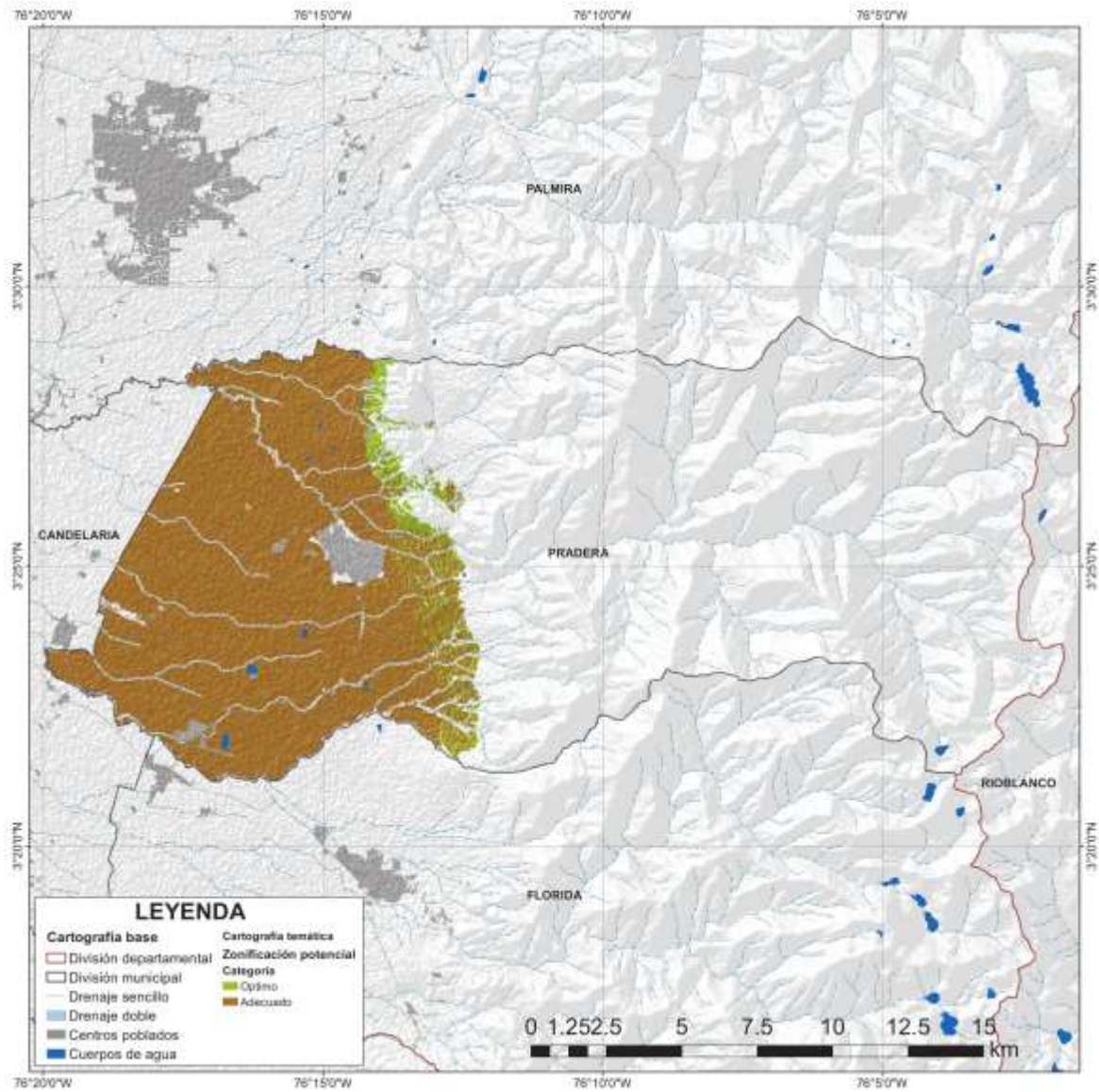
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Obando	13134.1	745.0	13879.1

### Anexo T. Mapa de zonificación potencial del municipio de Palmira.



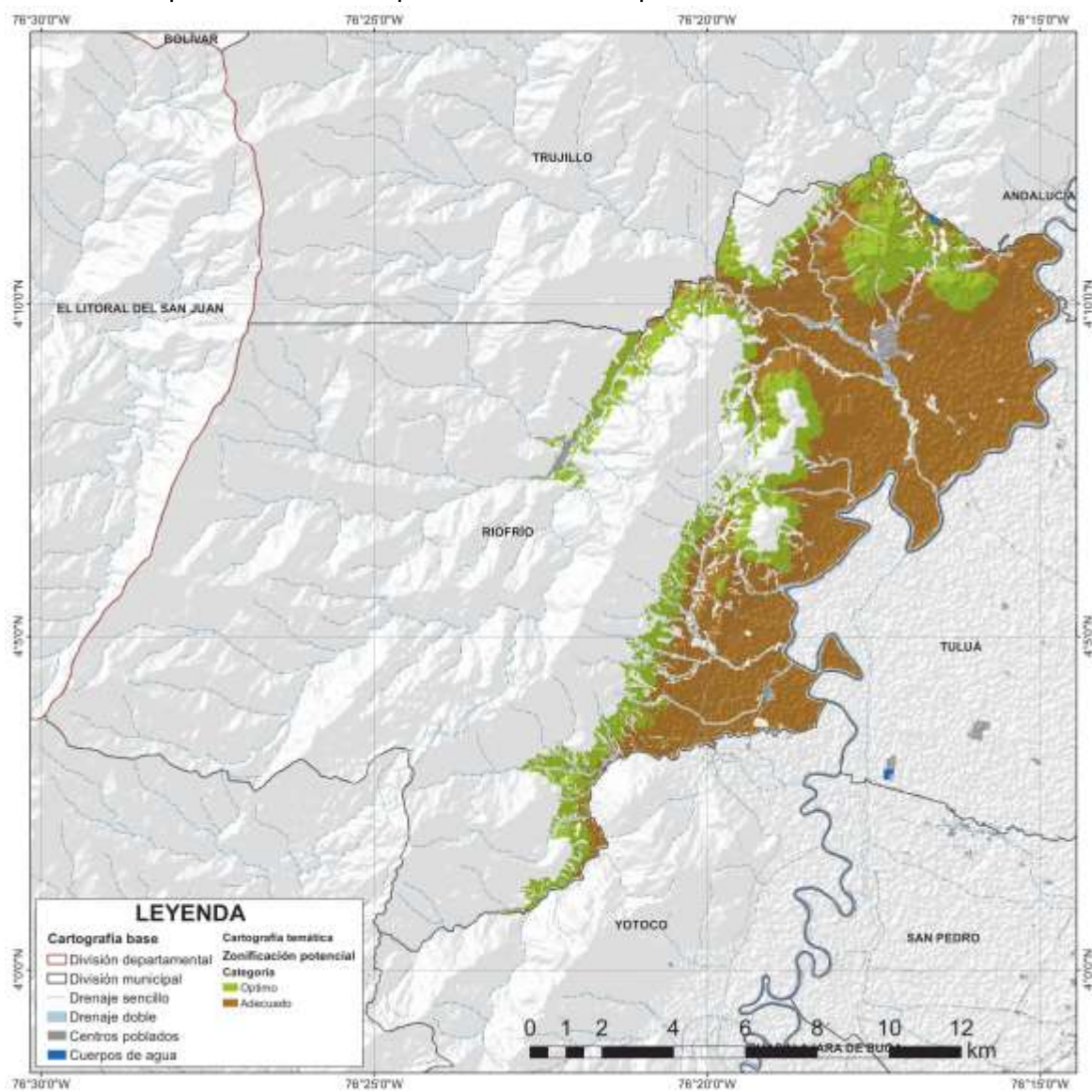
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Palmira	42502.3	1926.8	44429.1

**Anexo U. Mapa de zonificación potencial del municipio de Pradera**



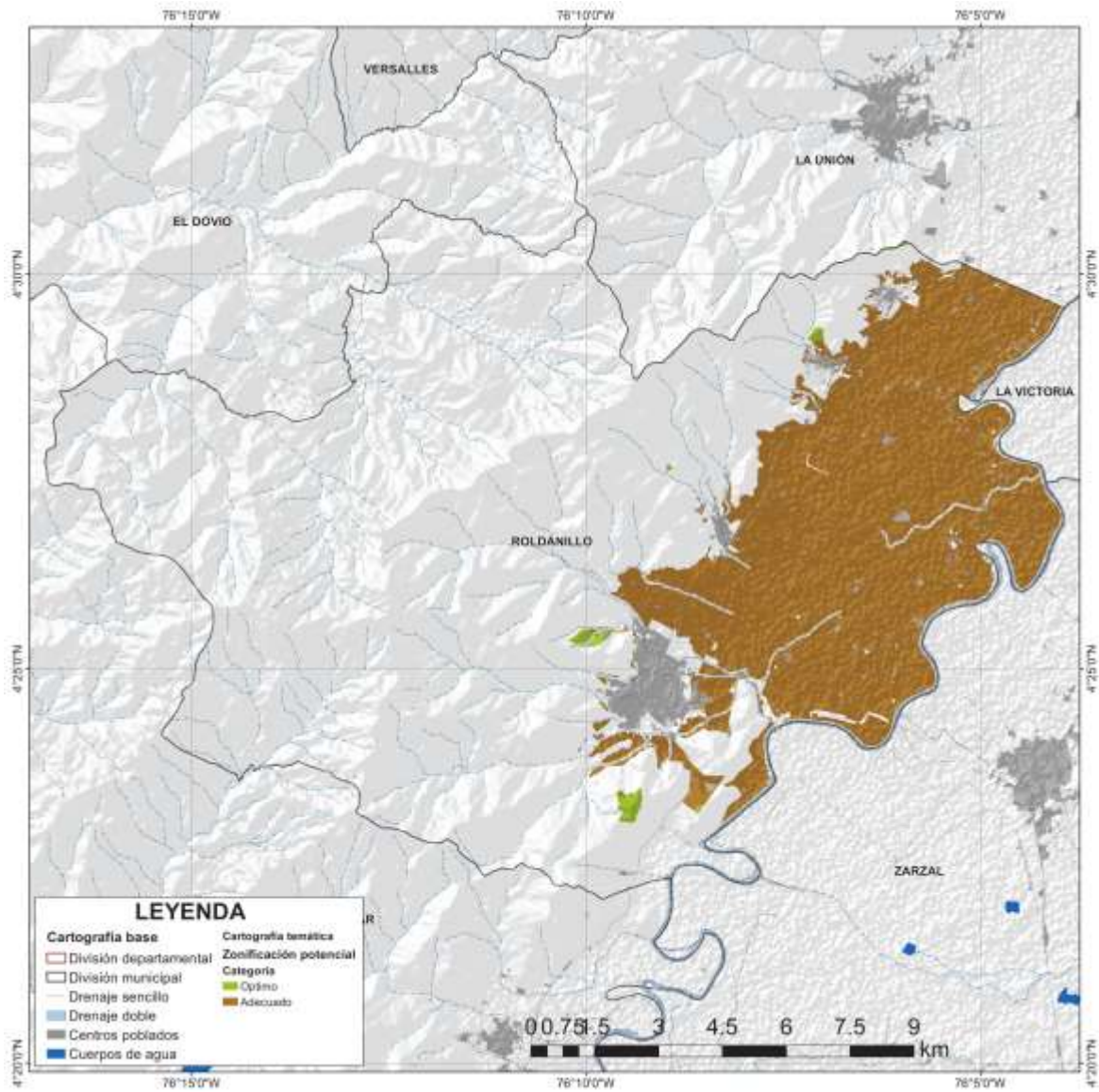
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Pradera	10839.4	738.6	11578.0

### Anexo V. Mapa de zonificación potencial del municipio de Riofrío



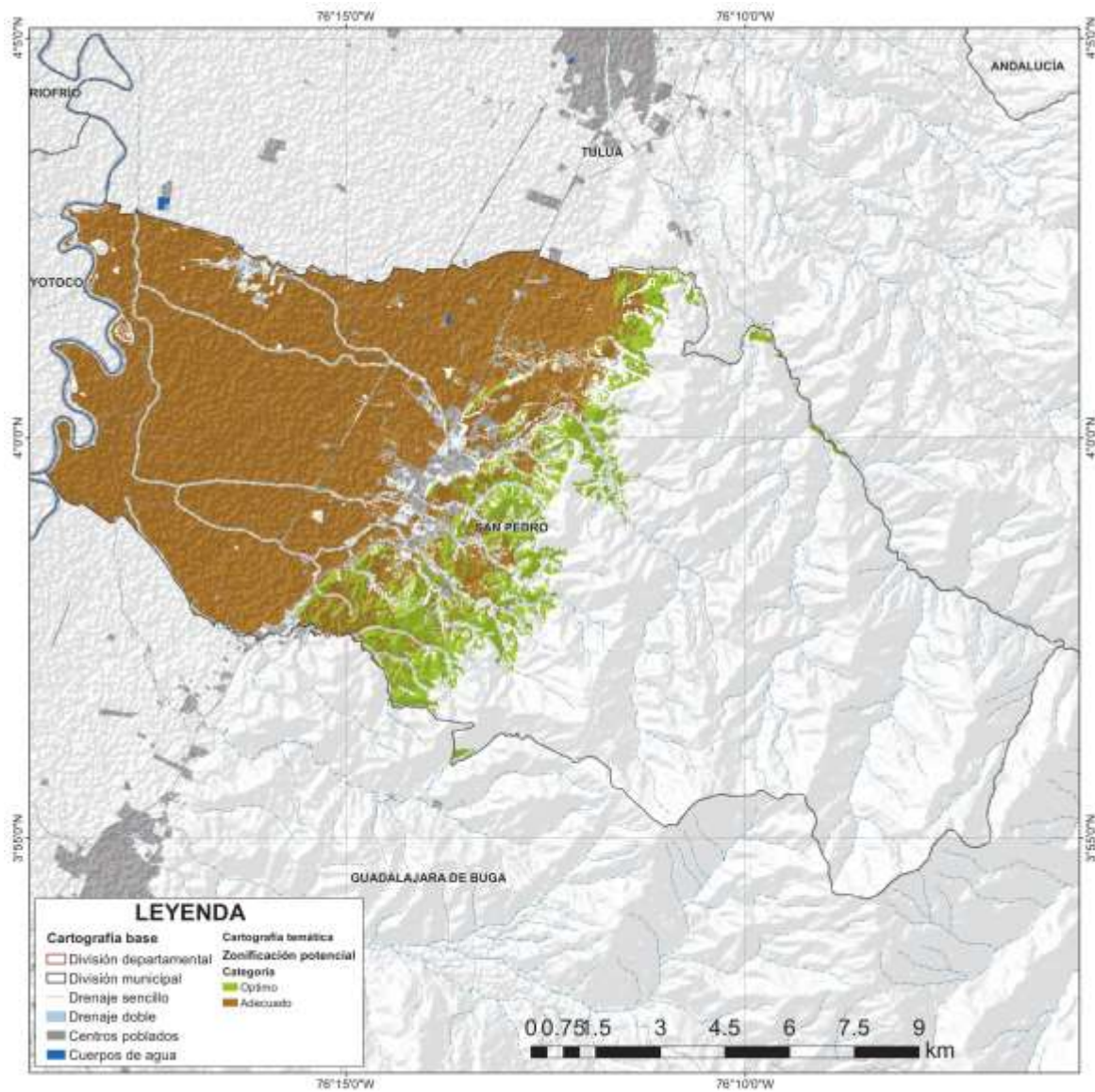
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Riofrío	6248.0	2460.3	8708.3

**Anexo W. Mapa de zonificación potencial del municipio de Roldanillo.**



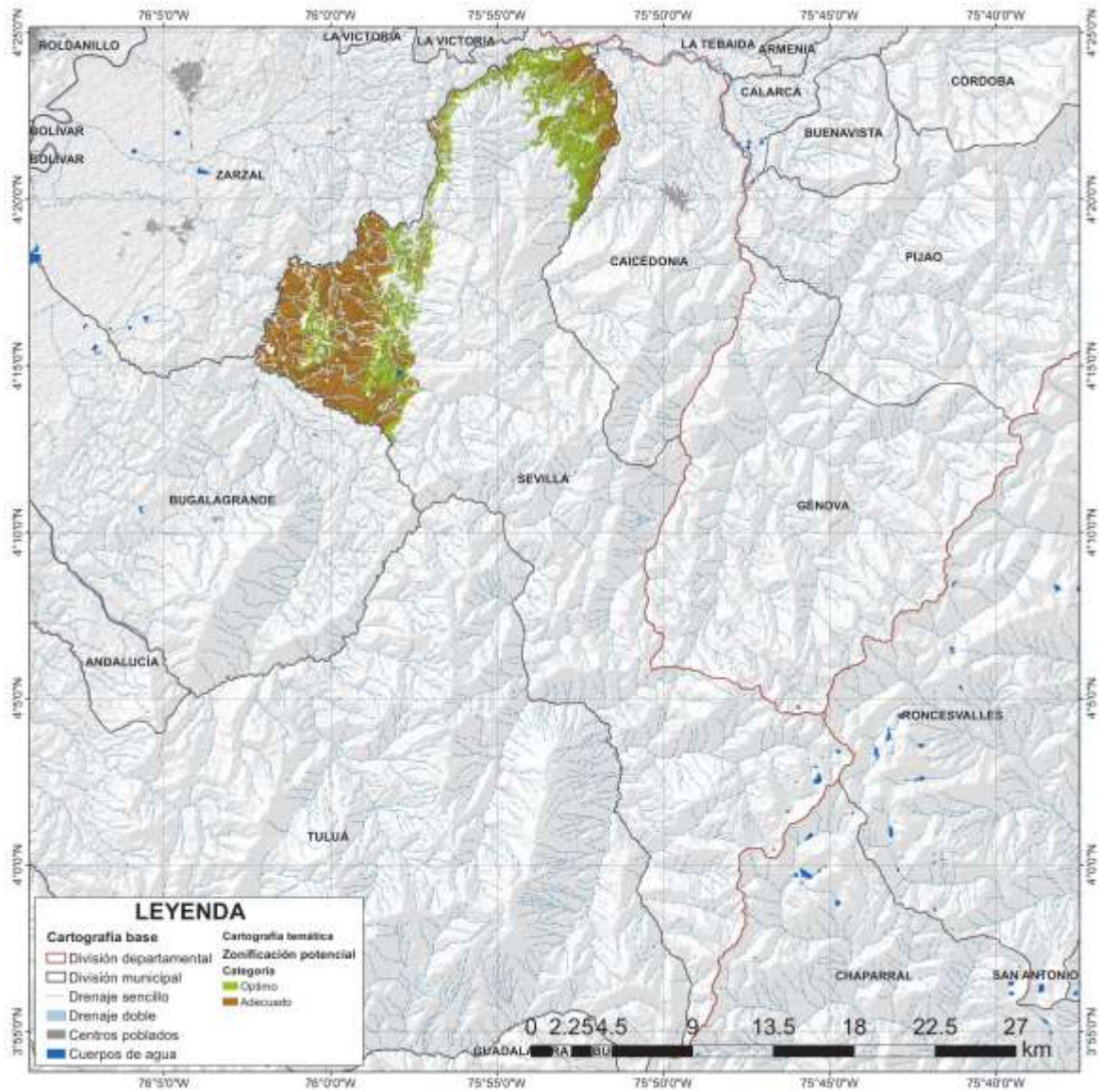
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Roldanillo	5900.4	75.0	5975.4

**Anexo X. Mapa de zonificación potencial del municipio de San Pedro.**



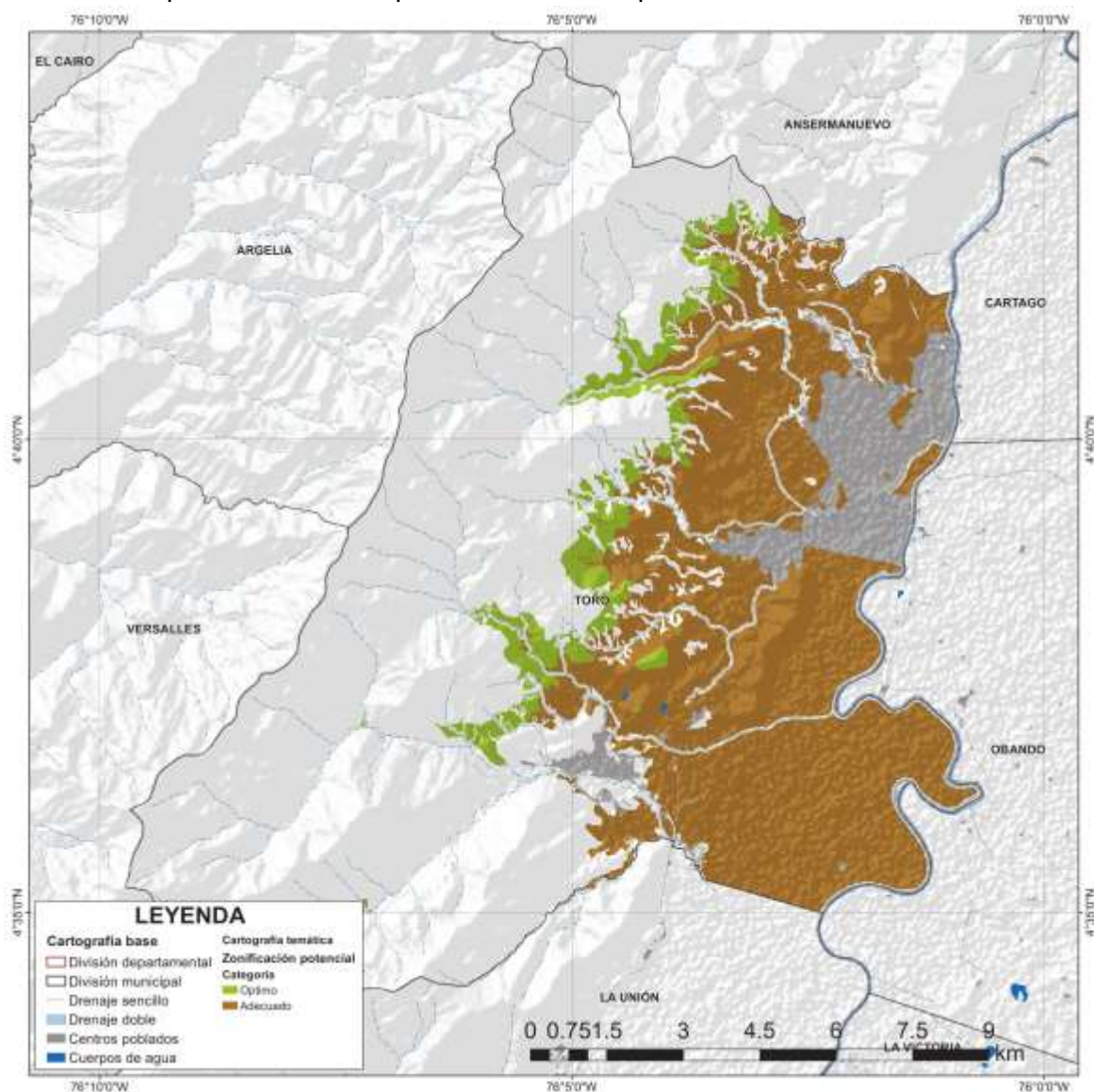
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
San Pedro	7229.8	1318.5	8548.3

**Anexo Y. Mapa de zonificación potencial del municipio de Sevilla.**



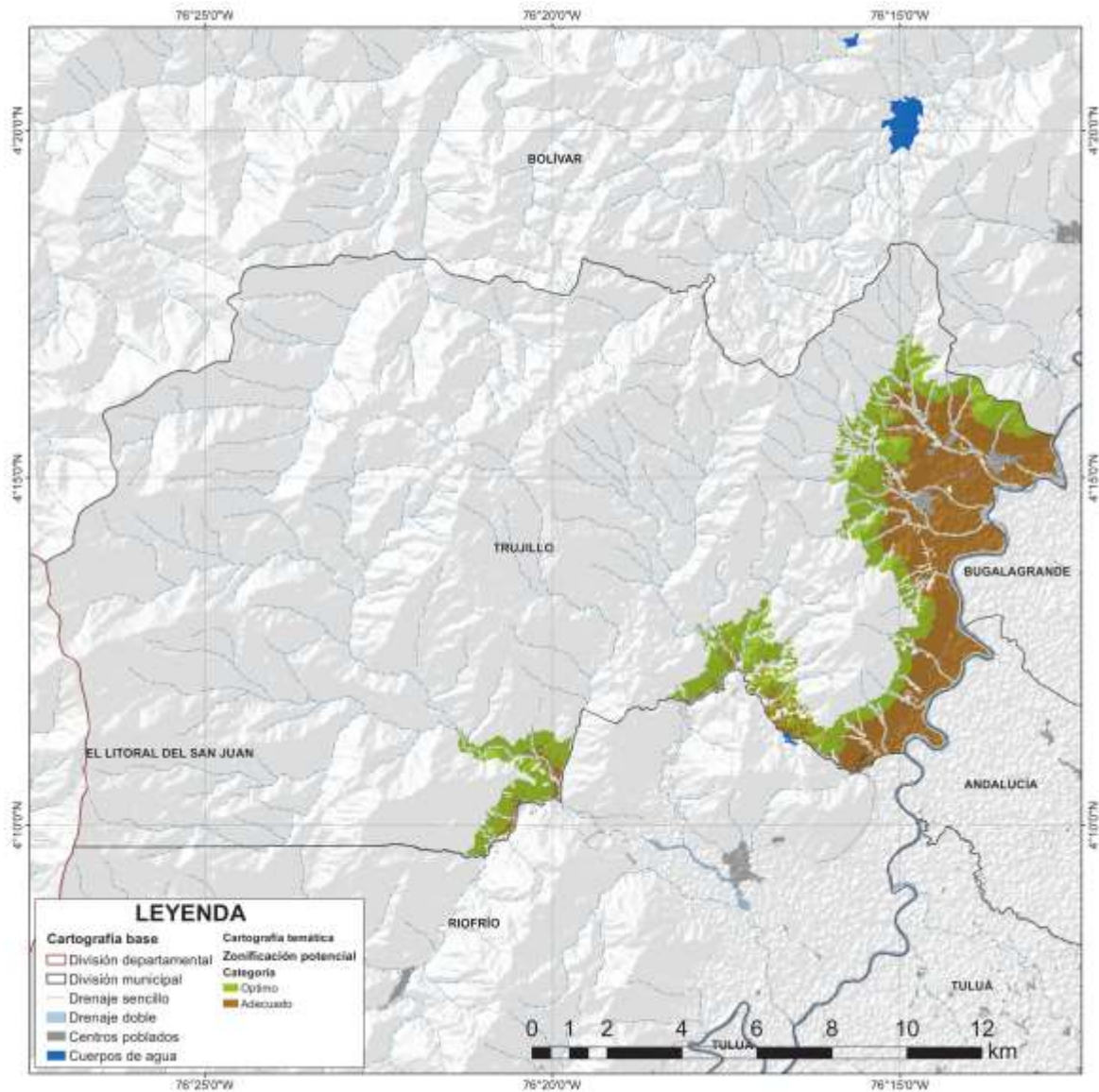
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Sevilla	5002.4	3403.1	8405.6

### Anexo Z. Mapa de zonificación potencial del municipio de Toro.



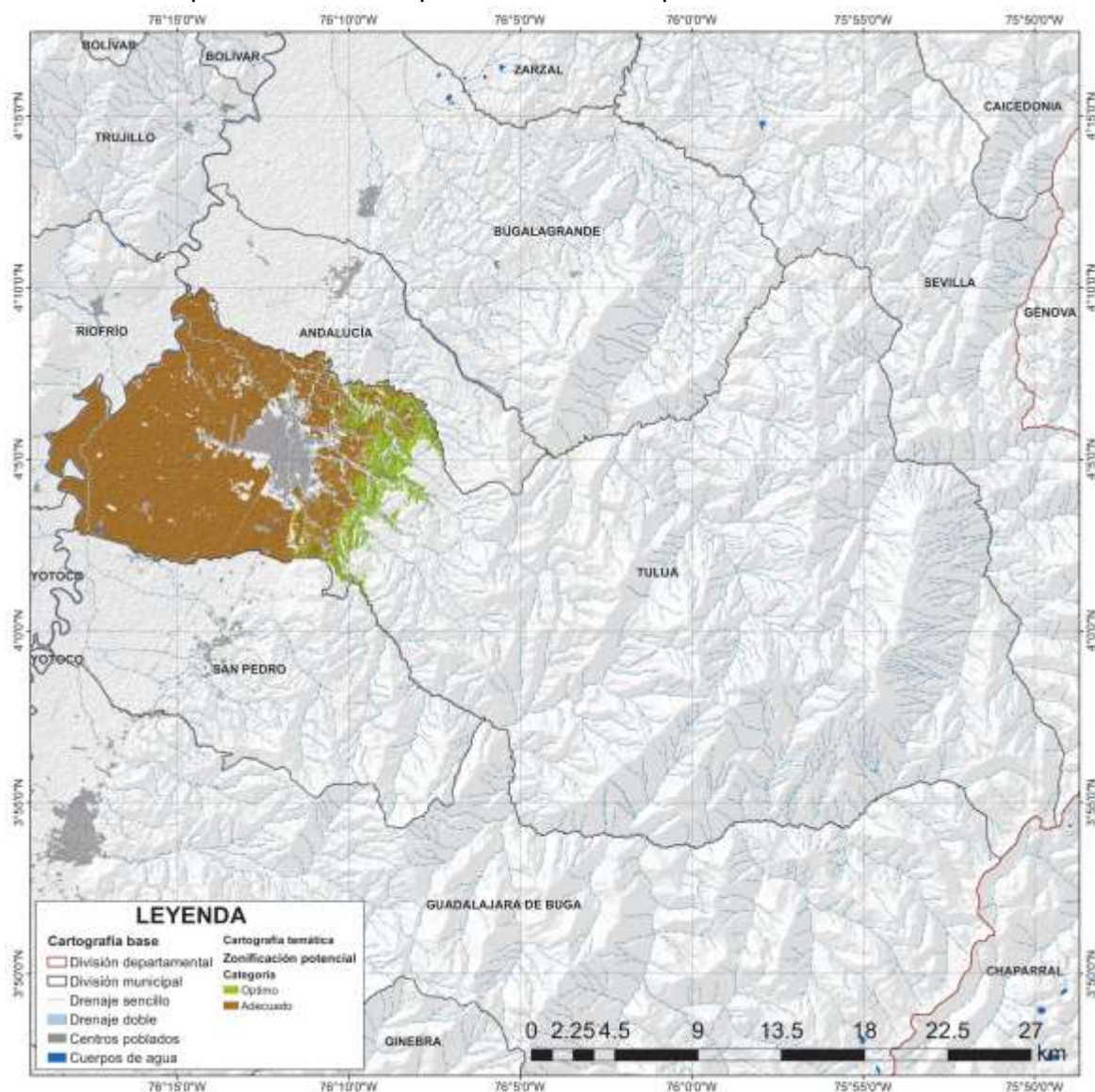
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Toro	5242.8	712.6	5955.5

## Anexo AA. Mapa de zonificación potencial del municipio de Trujillo.



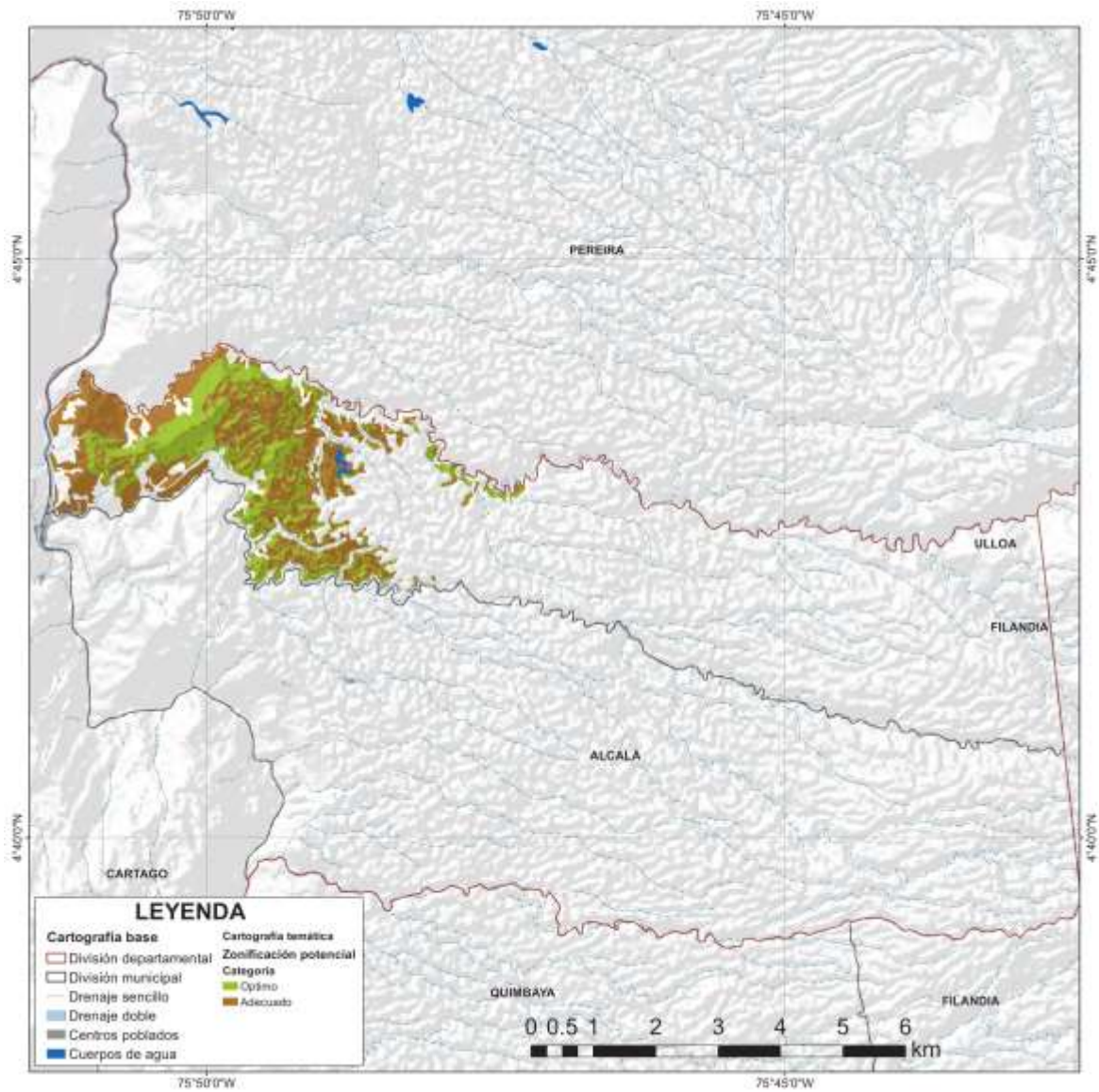
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Trujillo	1864.6	1516.5	3381.1

**Anexo AB.** Mapa de zonificación potencial del municipio de Tuluá.



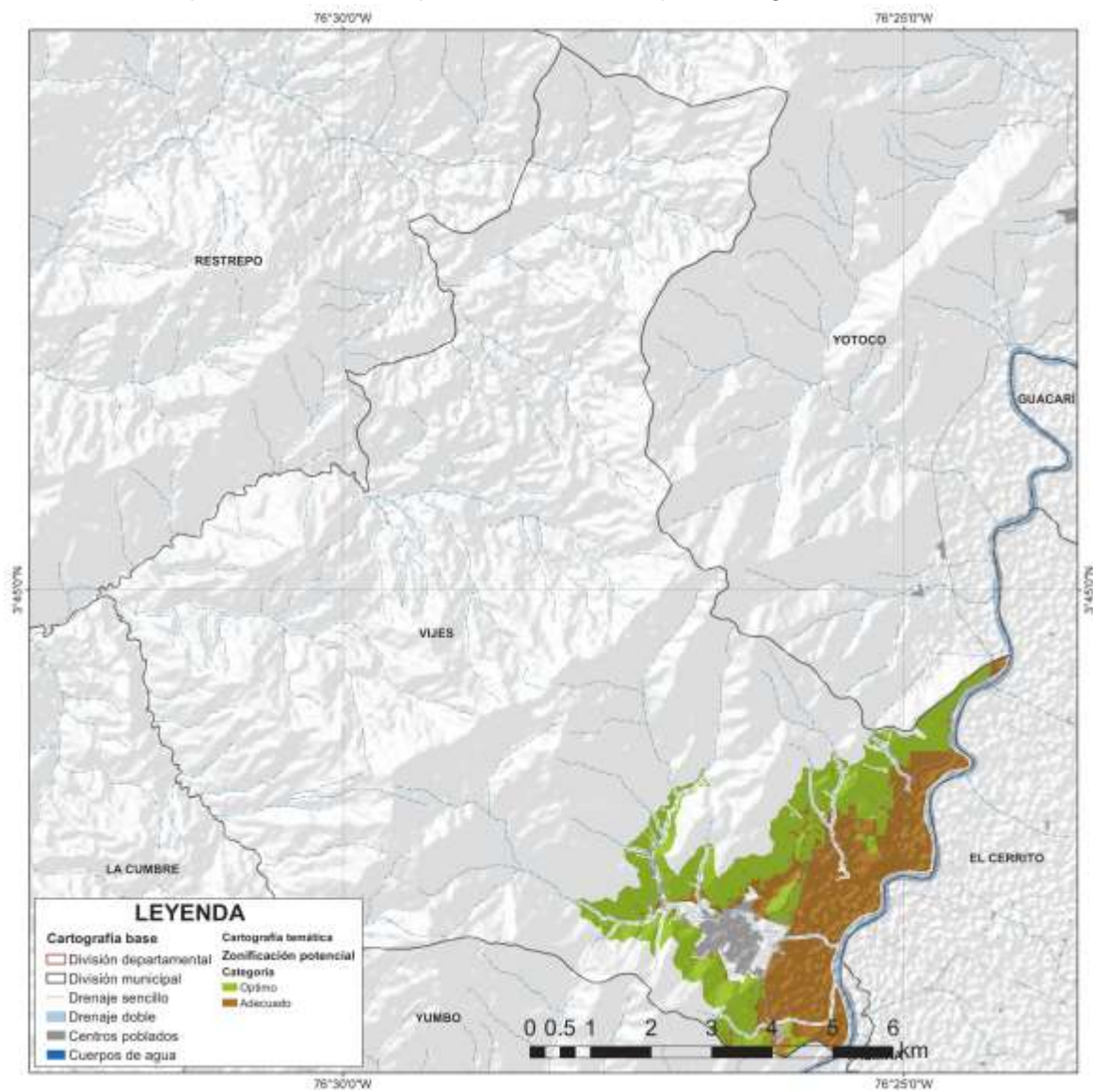
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Tuluá	13122.0	1825.5	14947.5

**Anexo AC. Mapa de zonificación potencial del municipio de Ulloa.**



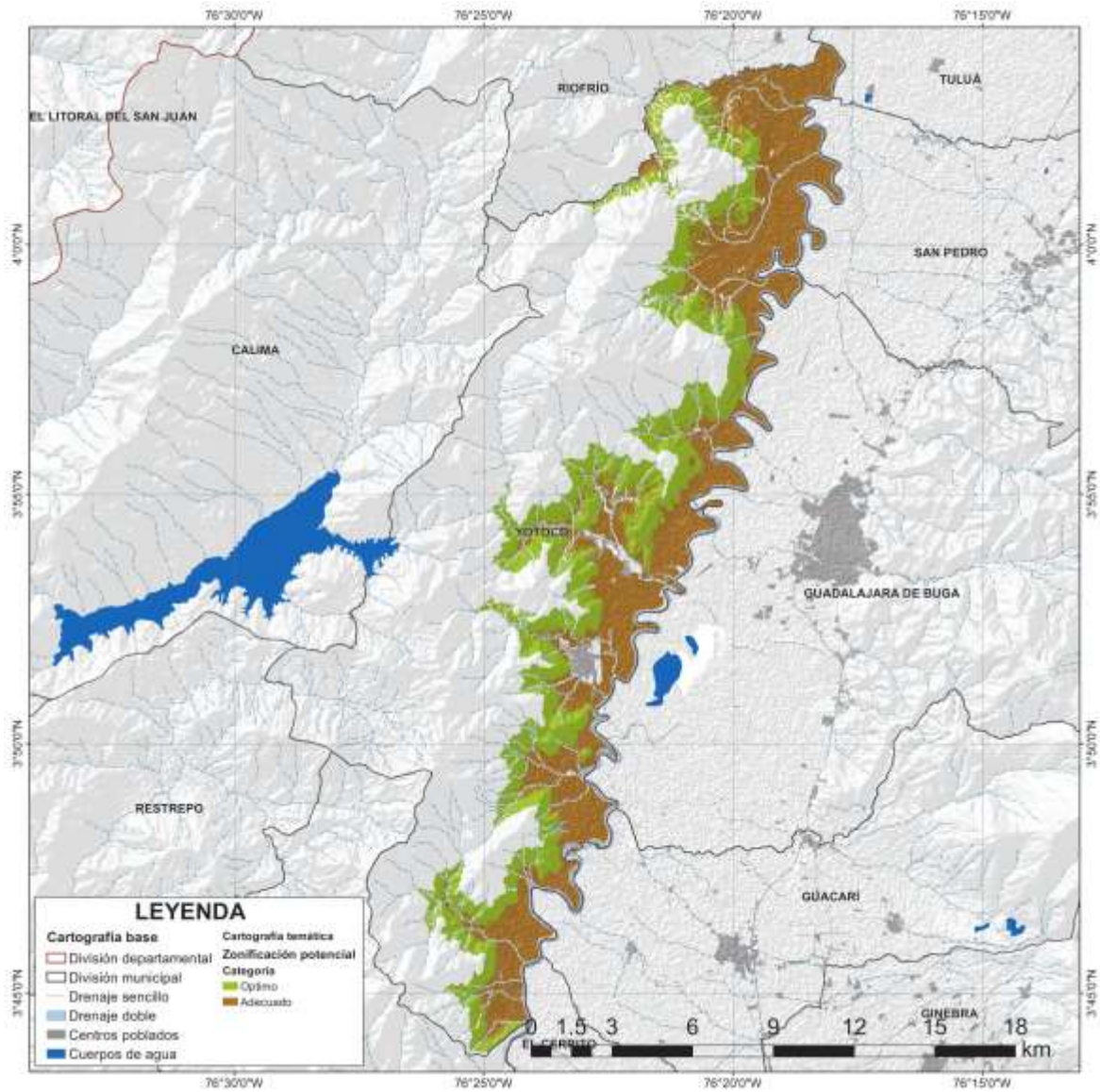
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Ulloa	551.8	378.2	930.0

**Anexo AD.** Mapa de zonificación potencial del municipio de Viges.



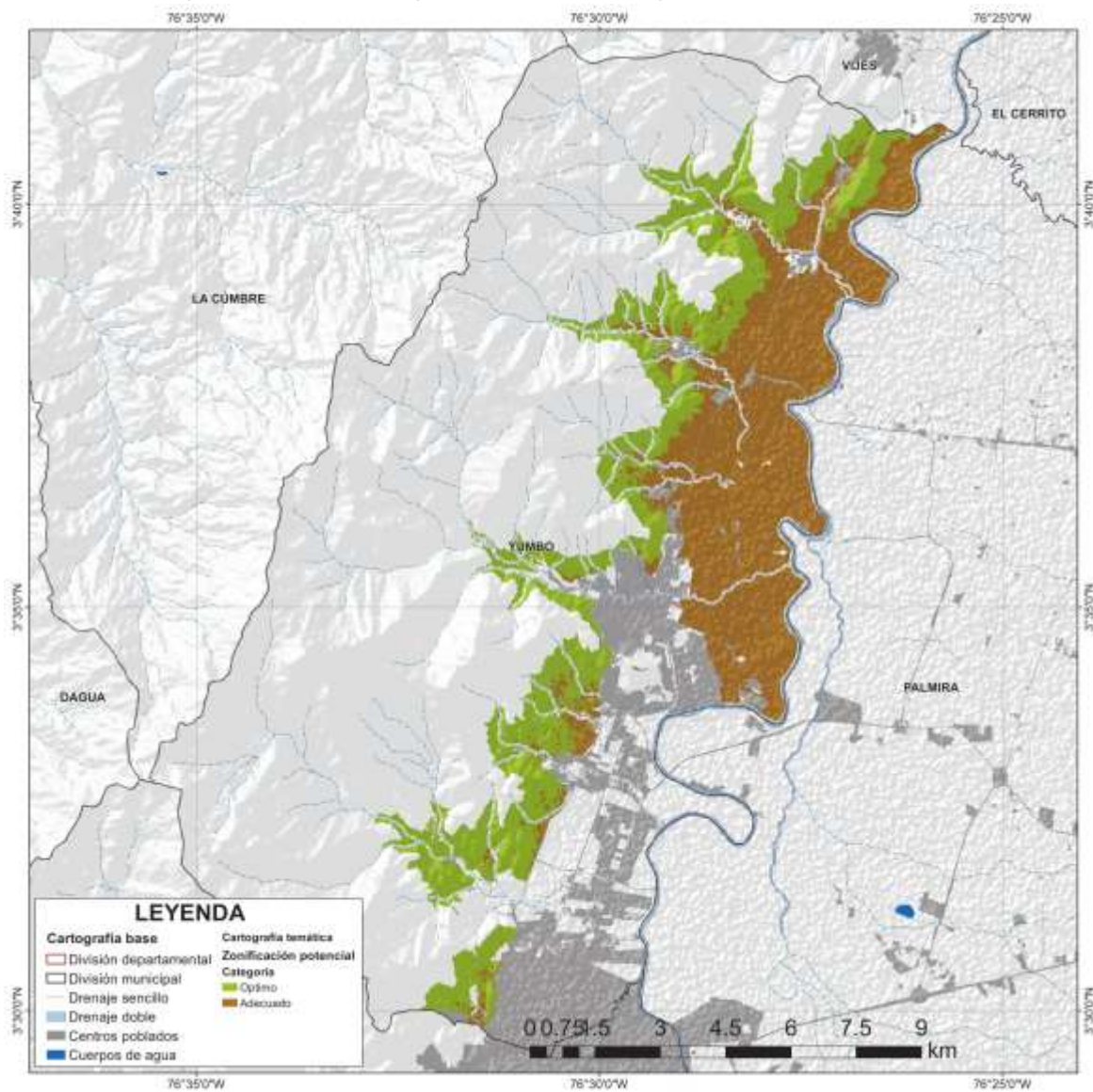
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Viges	613.8	674.2	1288.1

Anexo AE. Mapa de zonificación potencial del municipio de Yotoco.



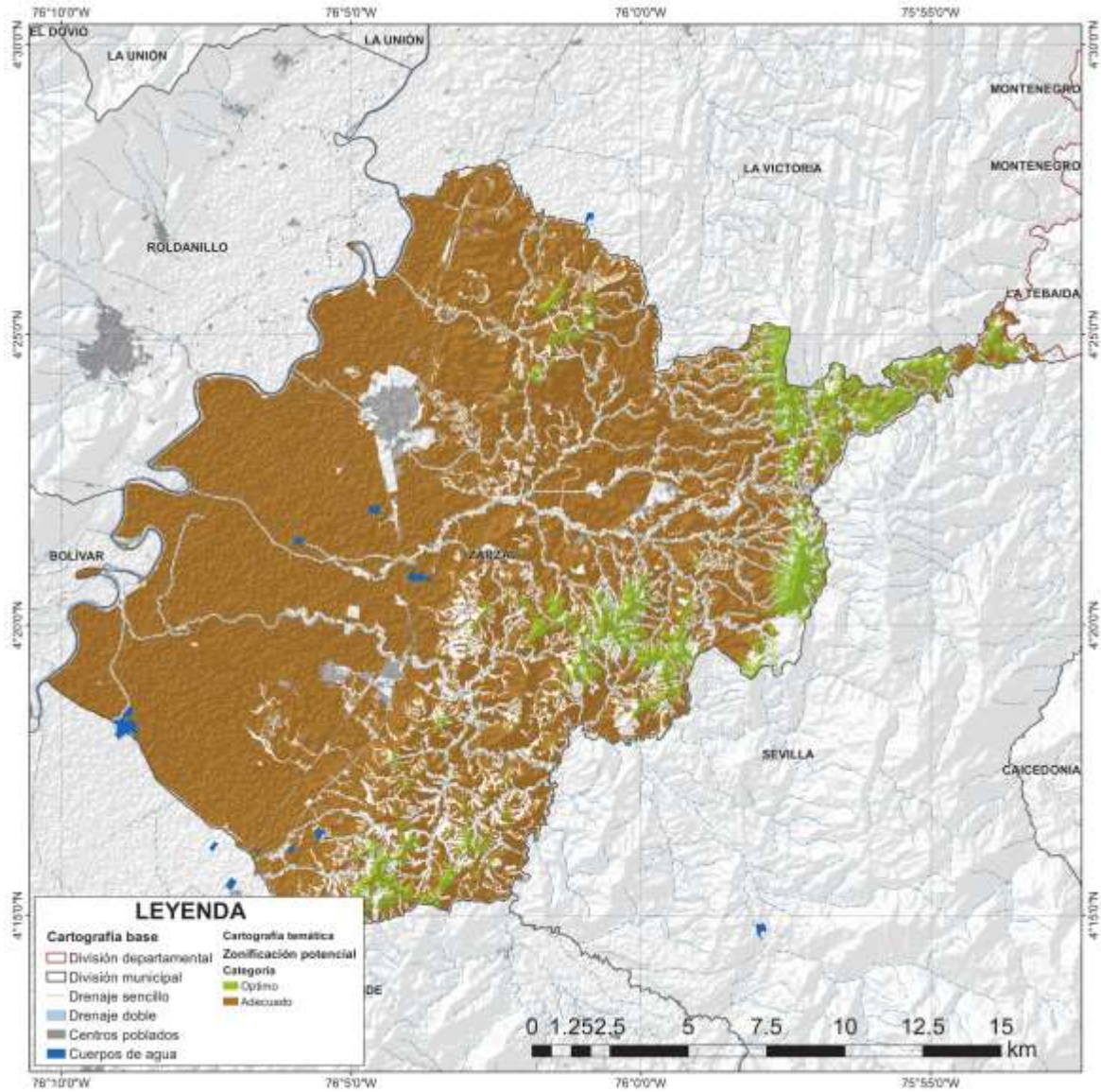
Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Yotoco	6741.5	5241.1	11982.5

**Anexo AF.** Mapa de zonificación potencial del municipio de Yumbo.



Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Yumbo	3119.8	2594.9	5714.7

**Anexo AG.** Mapa de zonificación potencial del municipio de Zarzal.



Municipio	Adecuado	Óptimo	Total área potencial
Zarzal	26818.0	2420.5	29238.5

Anexo AH. Mapa de zonificación potencial en el departamento del Valle del Cauca

