

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE QUÍMICA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería
Ambiental

**“Relación entre prevalencia, mortalidad y variables ambientales de la Enfermedad
Renal Crónica de causas desconocidas (ERCnt) en Carrillo, Costa Rica”**

Diego Blanco Castro

Cartago
Octubre, 2023

TEC | Tecnológico
de Costa Rica

ingeniería
ambiental


“Estudio de la relación entre prevalencia, mortalidad y variables ambientales de la Enfermedad Renal Crónica de causas desconocidas (ERCnt) en Carrillo, Costa Rica”

Informe presentado a la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental con el grado de licenciatura

Miembros del tribunal

VIRGINIA
MONTERO
CAMPOS (FIRMA)
Firmado digitalmente
por VIRGINIA MONTERO
CAMPOS (FIRMA)
Fecha: 2023.12.11
17:50:07 -06'00'

PhD. Virginia Montero Campos
Director(a)


M.Sc. Benedicto Valdés Rodríguez
Lector 1

ANDRES ROBLES
RAMIREZ (FIRMA)
Firmado digitalmente por
ANDRES ROBLES RAMIREZ
(FIRMA)
Fecha: 2024.01.18 15:05:16
-06'00'

M.Sc. Andrés Robles Ramírez
Lector 2

MARY LUZ BARRIOS HERNANDEZ (FIRMA)
PERSONA FISICA, CPF-01-1274-0561.
Fecha declarada: 14/12/2023 06:41:56 PM
Esta es una representación gráfica únicamente,
verifique la validez de la firma.

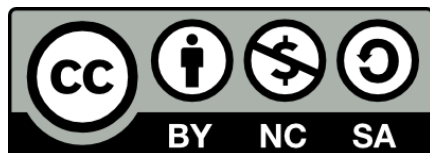
PhD. Mary Barrios Hernández
Coordinador(a) COTRAFIG

GUILLERMO DE
JESUS CALVO
BRENES (FIRMA)
Digitally signed by
GUILLERMO DE JESUS CALVO
BRENES (FIRMA)
Date: 2024.01.16 13:03:57
-06'00'

PhD. Guillermo Calvo Brenes
Director Escuela de Química

DIANA ALEXANDRA
ZAMBRANO
PIAMBA (FIRMA)
Firmado digitalmente por DIANA
ALEXANDRA ZAMBRANO PIAMBA
(FIRMA)
Fecha: 2024.01.16 08:18:30 -06'00'

M.Sc. Diana Alexandra Zambrano Piamba
Coordinadora Carrera de Ingeniería Ambiental



Esta obra está protegida bajo la licencia [Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

DEDICATORIA

A mi madre Gabriela por haberme impulsado siempre a seguir mis metas, por cuidarme y sostenerme. Este trabajo es un tributo a todo su esfuerzo y amor incondicional.

A mi hermano Alejandro por apoyarme en mi camino y estar a mi lado en los momentos más difíciles.

A mi gata Faranush y mi perro Taquito por ser una fiel compañía en este proceso, incluso en las noches de desvelo.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre porque ha sido mi inspiración, porque me ha transmitido su fuerza y porque ha sido la mejor compañía que podría haber tenido en este camino lleno de obstáculos y satisfacciones. La amo más allá de las palabras.

A mi hermano por ser mi compañero de experiencias y a mi familia por haber creído siempre en mí.

A mis amigos y compañeros por confortarme siempre que lo necesité y por haberme enseñado tantas cosas que me han hecho crecer. Por las experiencias tan bonitas que vivimos juntos en esta etapa y por lo bueno que sacamos de las malas.

A Perla porque nuestro entendimiento mutuo ha sido de mucha ayuda para mí y me ha hecho sentir acompañado de una forma especial. Agradezco su amistad que ha traído mucho amor a mi vida.

A mi profesora tutora PhD. Virginia Montero le agradezco por guiarme en este proyecto y darme luz con su sabiduría y conocimientos.

A todos los maestros y profesores que he tenido a lo largo de mi vida porque cada uno de ellos me enseñaron algo que me llevó a este punto. Especialmente a los profesores y funcionarios de la Carrera de Ingeniería Ambiental y de la Escuela de Química a quienes respeto y estimo mucho.

A la Dra Karol Matamoros por recibirme en el Laboratorio Clínico de Carrillo y colaborar con los datos de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	14
Abstract	15
1 introducción	16
1.1 <i>Objetivos</i>	18
1.1.1 <i>Objetivo general</i>	18
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	18
2 Revisión de literatura	19
2.1 <i>Enfermedad renal crónica</i>	19
2.2 <i>Enfermedad renal crónica de causas desconocidas</i>	20
2.3 <i>Factores asociados a la ERCnt</i>	22
2.3.1 <i>Agricultura</i>	22
2.3.2 <i>Factores ambientales</i>	23
2.3.3 <i>Genética</i>	24
2.4 <i>Situación en Costa Rica</i>	25
2.5 <i>Situación en Carrillo</i>	27
2.5.1 <i>Factores de riesgo y características de la zona de estudio</i>	28
2.6 <i>Sistemas de información geográfica en el análisis de los factores ambientales</i>	31
2.6.1 <i>Clasificación supervisada de imágenes satelitales</i>	32
3 Materiales y métodos	33
3.1 <i>Lugar de estudio</i>	33
3.2 <i>Visitas de campo</i>	34
3.3 <i>Procesamiento de los datos</i>	34
3.3.1 <i>Prevalencia de la enfermedad</i>	34
3.3.2 <i>Mortalidad de la enfermedad</i>	35
3.4 <i>Elaboración de los mapas</i>	36
3.4.1 <i>Clasificación supervisada en QGIS</i>	37
4 Resultados y discusión	39

4.1	<i>Indicadores epidemiológicos</i>	39
4.2	<i>Tasas de mortalidad y prevalencia</i>	41
4.3	<i>Factores geográficos</i>	42
4.3.1	Clima	42
4.3.2	Suelos	46
4.3.3	Relieve, vulcanismo y patrones de viento	46
4.3.4	Clasificación supervisada de Carrillo	50
5	 conclusiones y recomendaciones	53
5.1	<i>Conclusiones</i>	53
5.2	<i>Recomendaciones</i>	55
6	 Referencias	56
	apéndices	62
	Apéndice 1: Código para generar mapas de temperatura superficial	63
	Apéndice 2: Combinaciones de bandas más relevantes	66
	Apéndice 3: fotos del suelo	68
	anexos	69
	Anexo 1: Técnica de clasificación	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Estructura principal del riñón y de su unidad de funcionamiento, la nefrona [2].	19
Figura 2.2: Zonas con una elevada prevalencia de la Nefropatía Mesoamericana [21].	21
Figura 2.3: Incidencia acumulada de mortalidad por ERC distribuidas por cantón de Costa Rica 2000-2016 [7].	26
Figura 2.4: Tasas de mortalidad ajustada por edad por cada 100 000 habitantes a causa de la ERCnt en Guanacaste versus Costa Rica por periodos de 5 años entre 1970 y 2012 [4].	27
Figura 2.5: Riesgo relativo de mortalidad suavizado por ERCnt por cantones en hombres mayores a 20 en cuatro periodos desde 1970 a 2012 [4].	28
Figura 2.6: Distribución espacial de las zonas cañeras de la región de Guanacaste (Zonas Este y Oeste) [36].	29
Figura 3.1: Distritos de Carrillo con sus principales poblados y rutas. Fuente de capas: [45]	33
Figura 4.1: Frecuencias de casos sospechosos de ERCnt según grupo etario para hombres y mujeres, en el cantón de Carrillo en los años 2019-2022.	39
Figura 4.2: Distritos de Carrillo según sus tasas, ajustadas a 100 000 habitantes, de A) prevalencia (2019-2022) y B) mortalidad (2021-2022). En rojo Filadelfia, en naranja Palmira, en amarillo Belén y en crema Sardinal.	41
Figura 4.3: Temperaturas máximas promedio de la estación meteorológica de La Guinea, Carrillo, en el periodo 1970-2006.	42
Figura 4.4: Temperatura superficial diurna, en Celsius, de Costa Rica durante los años 2019-2022 calculada a partir de las imágenes satelitales MODIS.	43
Figura 4.5: Temperatura superficial diurna, en Celsius, de los distritos de Carrillo durante los años 2019-2022 calculada a partir de las imágenes satelitales MOIDS.	44
Figura 4.6: Días de lluvia en el territorio nacional, con respecto, con Carrillo delineado. Fuente de capas: [54]	45
Figura 4.7: Ordenes de suelo presentes en el cantón de Carrillo. Fuente de capas: [54]	46
Figura 4.8: Relieve del cantón de los distritos del cantón de carrillo basado en un MED. ...	48

Figura 4.9: Volcanes de la cordillera volcánica de Guanacaste, Lago Arenal y relieve de la zona, con Carrillo resaltado..... 49

Figura 4.10: Cobertura del suelo de los distritos de Carrillo obtenidos mediante la clasificación supervisada de una imagen satelital Landsat 9 de abril del 2023..... 50

LISTA DE CUADROS

Cuadro 2.1: Etapas de la ERC de acuerdo con la TFG y sus efectos en la salud del paciente [15].	20
Cuadro 2.2: Características y usos de los órdenes de suelo con mayor presencia en Carrillo [37].	30
Cuadro 3.1: Parámetros tomados en cuenta para la filtración de los casos de ERC a casos sospechosos de ERCnt.....	35
Cuadro 3.2: Herramientas de QGIS utilizadas y su función [46].	36
Cuadro 3.3: Combinaciones RGB de las bandas de la imagen satelital usadas para los diferentes análisis visuales durante el entrenamiento [47].	38
Cuadro 4.1: Resumen de los resultados obtenidos producto de la filtración de datos de prevalencia y de mortalidad de la ERCnt para los cuatro distritos de Carrillo.	40
Cuadro 4.2: Altitudes máximas y mínimas de los distritos de Carrillo según el MED realizado, así como la altitud del pueblo principal de cada distrito.....	47

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ERCnt	Enfermedad renal crónica de causas desconocidas
CKDu	<i>Chronic Kidney Disease of Unknown Etiology</i>
SIG	Sistemas de información geográfica
KDIGO	<i>Kidney Disease: Improving Global Outcome</i>
IMN	Instituto Meteorológico Nacional
CCSS	Caja Costarricense del Seguro Social
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censo
ERC	Enfermedad Renal Crónica
TFG	Tasa de filtración glomerular
EBAIS	Equipo Básico de Atención Integral de Salud
MED	Modelo de elevación digital
IGN	Instituto Geográfico Nacional
RGB	Composición rojo-verde-azul

RESUMEN

La enfermedad renal crónica de causas desconocidas (ERCnt) es un problema de salud pública emergente que no presenta los factores de riesgo tradicionales (hipertensión, diabetes y tener más de 65 años) y se da en ciertas zonas del mundo con algunas características en común como: baja elevación, amplia actividad agrícola, clima cálido y húmedo. En Costa Rica se presenta una mayor incidencia en las zonas bajas de la provincia de Guanacaste. Por ello, se hizo un análisis de la relación de los factores geográficos con la prevalencia y mortalidad de la enfermedad mediante sistemas de información geográfica y clasificación supervisada. Se obtuvieron mapas, modelos digitales y figuras que permitieron hacer las relaciones de interés. Se encontraron resultados coincidentes dentro de Carrillo con respecto al comportamiento de la enfermedad en otras regiones; así como, una correspondencia entre las tasas calculadas y las características analizadas.

Palabras clave: Toxicología Ambiental, Medicina Geológica, Riesgo toxicológico, Clasificación supervisada, ERCnt.

ABSTRACT

Chronic Kidney Disease of Unknown Etiology (CKDu) is an emerging public health issue that lacks traditional risk factors (hypertension, diabetes, old age) and manifests in specific regions worldwide with common features such as low elevation, extensive agricultural activity, and a warm humid climate. In Costa Rica, higher rates of CKDu are observed in the low-lying areas of the Guanacaste province. Consequently, this study was conducted to explore the correlation between geographical factors with the prevalence and mortality of the disease, utilizing geographical information systems and supervised classification. This approach generated maps, digital models, and figures that facilitates the examination of pertinent relationships. Consistent findings were identified within Carrillo concerning the disease's behavior compared to other regions, along with a correlation between calculated rates of CKDu and analyzed characteristics.

Key words: Environmental Toxicology, Geological Medicine, Toxicological Risk, Supervised classification, CKDu.

1 INTRODUCCIÓN

En las últimas dos décadas se ha reportado, en ciertas partes del mundo, un aumento en los casos de personas jóvenes con enfermedad renal crónica sin tener factores de riesgo tradicionales tales como diabetes, hipertensión, obesidad y ser mayor de 65 años [1]. A esta condición se le conoce como ERCnt la cual es un problema de salud pública emergente con una incidencia en aumento [2]. Como su nombre lo indica, las causantes de dicha patología no han sido comprobadas; sin embargo, se han descrito y se están reconociendo actualmente. Por ejemplo, algunos estudios recientes sugieren la posible relación con factores atmosféricos, ambientales, geológicos y los asociados a agricultura intensiva [3].

La situación en Costa Rica es similar a otros países del mundo (India, Sri Lanka, países de Mesoamérica, entre otros) en cuanto la ERCnt se da en zonas rurales, calientes y con actividades productivas relacionadas a la agricultura; siendo Guanacaste la provincia más afectada del país [4].

La hipótesis derivada de trabajos anteriores, que se plasma en el artículo de Montero et al [5], establece que en los cantones con mayor tasa de mortalidad de la enfermedad, Cañas y Bagaces, hay diferencias entre los distritos de cada uno y que estas diferencias obedecen a la localización con respecto a la altitud, movimiento atmosférico de partículas y las variables que esto implica: naturaleza fina de las partículas del suelo (arenosos), patrones de viento, presencia de cultivos de caña de azúcar y su quema.

El cantón de Carrillo que tiene una extensión 577,54 km² y una población de 45 047 [6], resulta de especial interés debido a que no cuenta con un estudio que relacione la prevalencia y la mortalidad a un nivel geográfico, a pesar de ser el tercero con mayor afectación en el país [7]. En el país ya se han hecho estudios de este tipo en los cantones de Cañas y Bagaces donde se ha hallado una relación de algunos factores ambientales con la ERCnt [8], [9].

Por ello, el objeto de esta investigación es generar un estudio que haga dicha relación a través de los sistemas de información geográfica (SIG), debido a que estos son una poderosa herramienta para visualizar datos espaciales y generar información que permita manejar un

terreno y dar una mejor gestión a una problemática ambiental [10]. Asimismo, la organización KDIGO (*Kidney Disease: Improving Global Outcome*) recomienda hacer estudios de este tipo con la ERCnt debido a que sientan un precedente para emitir medidas de gestión epidemiológica y políticas en salud pública [11].

Para generar los productos deseados se utilizaron los datos referentes a este tema del Instituto Meteorológico Nacional (IMN), de la Caja Costarricense del Seguro Social (CCSS) y del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). Con esto se logró determinar los casos sospechosos, las defunciones y las condiciones climatológicas; posteriormente se calcularon las tasas de mortalidad y prevalencia de cada distrito del cantón y se hizo la relación con los factores geográficos, a través de las capas generadas, el modelo de elevación digital adoptado y la clasificación supervisada del área de estudio.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

Analizar la situación de la ERCnt en el cantón de Carrillo con respecto a las características geográficas de la zona.

1.1.2 Objetivos específicos

- A) Describir los patrones de prevalencia y mortalidad de la ERCnt en Carrillo, a nivel poblacional y espacial.
- B) Contrastar las variables geográficas de Carrillo con los indicadores epidemiológicos de la enfermedad.
- C) Generar un análisis del relieve y uso del suelo de Carrillo con respecto a la prevalencia de la ERCnt en los distritos del cantón.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ENFERMEDAD RENAL CRÓNICA

Los riñones son dos órganos ubicados entre el diafragma y los intestinos, los cuales se encargan de filtrar desechos de la sangre y enviarlos a la orina, siendo esto vital en el balance electrolítico y de fluidos del cuerpo [12]. Cada riñón cuenta con aproximadamente un millón de nefronas, que son las unidades de filtración, donde la sangre pasa por un filtro llamado glomérulo y las sustancias necesarias son devueltas o desechadas gracias al túbulo, como se puede observar en la Figura 2.1 [13].

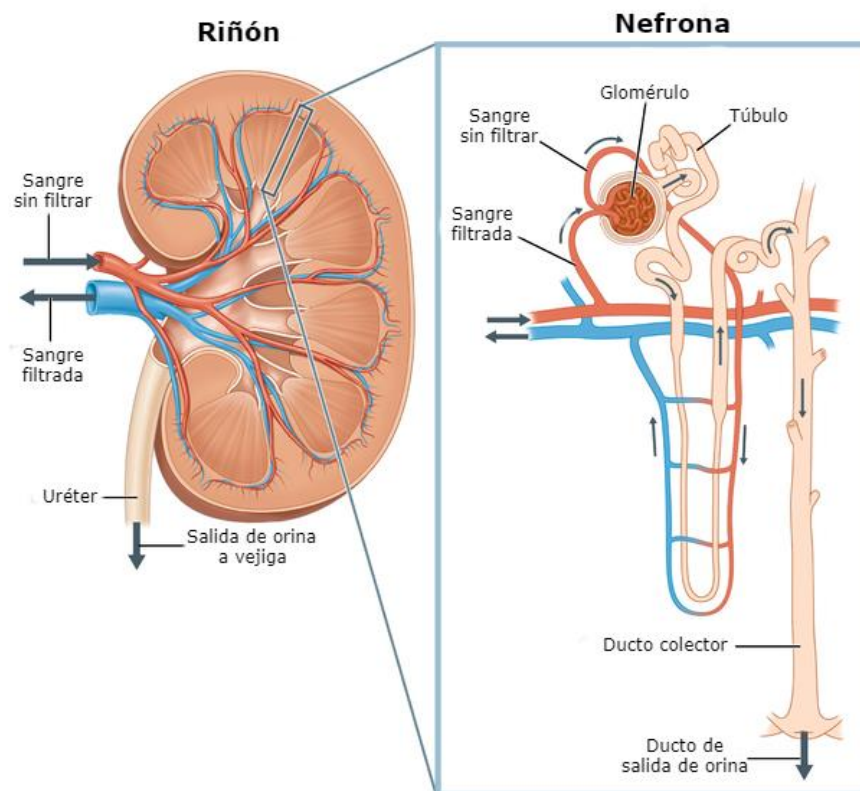


Figura 2.1: Estructura principal del riñón y de su unidad de funcionamiento, la nefrona [2].

La enfermedad renal crónica (ERC) se define como una alteración sostenida en la estructura de los riñones, en sus funciones o en ambas, afectando el estado de salud del paciente. De esta manera, los riñones pierden progresivamente la capacidad para filtrar la sangre con productos del metabolismo, al punto en el que se llega a la falla renal, en la cual los riñones ya no pueden cumplir su objetivo y la persona no puede sobrevivir si no se somete a una

diálisis o un trasplante de riñón [14]. Esta enfermedad se puede clasificar en cinco etapas de acuerdo con el estado en que se encuentran los riñones y el grado de insuficiencia, basándose en la tasa de filtración glomerular (TFG) [11], como se muestra en el Cuadro 2.1.

Cuadro 2.1: Etapas de la ERC de acuerdo con la TFG y sus efectos en la salud del paciente [15].

Etapa	TFG (mL/min/1,73 m²)	Estado de los riñones	Síntomas y signos
E1	> 90	Daño renal leve, los riñones funcionan de forma normal	Asintomático y posible presencia de proteína en orina
E2	60 - 89	Daño renal leve, los riñones funcionan bien	Generalmente asintomático. Posible presencia de proteína en orina y daño físico
E3	30 - 59	Daño renal moderado, los riñones no funcionan tan bien como deberían	Empieza la acumulación de fluidos que causa hipertensión, enfermedades óseas, hinchazón de pies y manos. Cansancio y debilidad.
E4	15 - 29	Daño renal severo, los riñones están próximos a dejar de funcionar.	La acumulación de fluidos ha causado hipertensión, enfermedades cardíacas y óseas. Evidente hinchazón de extremidades y dolor de espalda baja
E5	< 15	Máximo daño renal, los riñones se encuentran en falla.	Malestar severo, anuria, retención de fluidos. Problemas cardíacos, respiratorios, sanguíneos, óseos, etc. Desbalances electrolíticos. Se requiere trasplante o diálisis para sobrevivir

Las causas de esta enfermedad suelen ser la diabetes, la hipertensión arterial y derivada de otras patologías en riñones. Otros factores de riesgo considerables son: obesidad, tener más de 65 años, genética, consumo de medicamentos nefrotóxicos, enfermedades cardíacas y autoinmunitarias, entre otras [16].

2.2 ENFERMEDAD RENAL CRÓNICA DE CAUSAS DESCONOCIDAS

Este término hace referencia a un problema de salud emergente en países en vías de desarrollo como Sri Lanka, Egipto, India, México, Guatemala, Nicaragua y Costa Rica. En todos estos

se da en ciertas zonas rurales de climas cálidos e incide más en hombres que en mujeres; así como, en personas agricultoras [17]. Esta es un tipo de nefritis intersticial crónica, es decir, que ocurre una inflamación entre los túbulos por más de tres meses; su nombre se debe a que no se ha establecido la causa o las causas concretas de esta patología, a pesar de que se ha estudiado globalmente desde hace más de 20 años [18]. Además, se observa que la población afectada suele no presentar los tradicionales factores de riesgo asociados a la ERC [19]. También se le conoce como Nefropatía Mesoamericana cuando se habla específicamente de los países de la región de Mesoamérica, siendo descrita por primera vez en Costa Rica en la década de 1970 [20]. En la Figura 2.2 se puede notar cómo este patrón se cumple en las zonas afectadas de la región centroamericana.

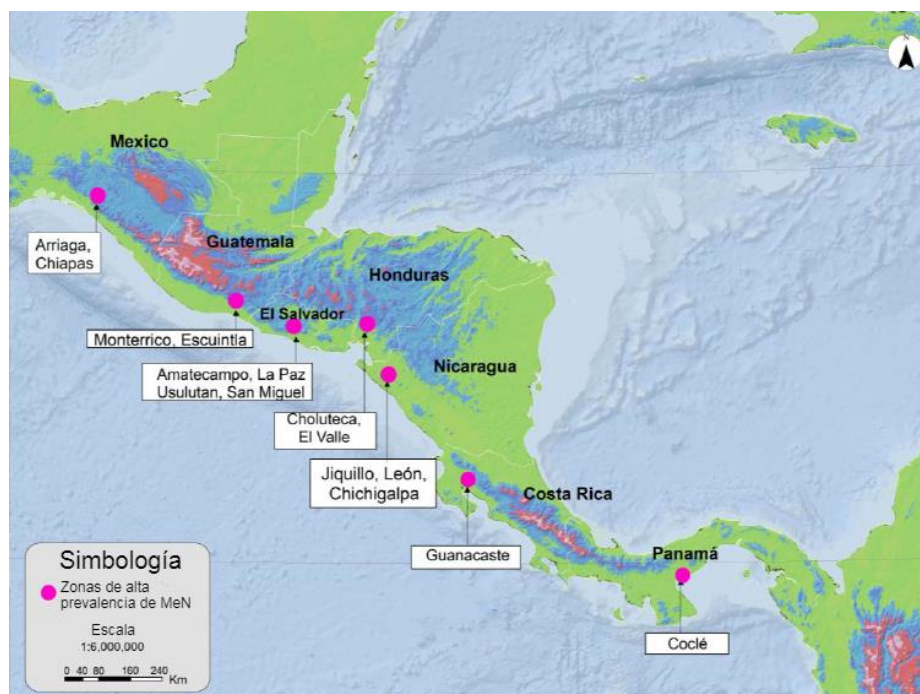


Figura 2.2: Zonas con una elevada prevalencia de la Nefropatía Mesoamericana [21].

La ERCnt comienza con un aumento asintomático de la creatinina sérica, en ocasiones se presenta fatiga y fiebre [22]. Debido a esto, cuando se hace el diagnóstico de un paciente con la afección este ya se encuentra en etapas más avanzadas, como la 4 y 5, donde se presentan síntomas más específicos, pero ya requieren de tratamiento dialítico o trasplante, debido a la irreversibilidad del problema en este punto [23].

Al igual que en la ERC, la tasa de filtración glomerular va disminuyendo conforme avanza la enfermedad y en estudios histológicos se puede observar atrofia tubular y fibrosis [23]. Por lo cual, la detección temprana y un cuidado adecuado pueden contribuir al retraso del uso de diálisis o la necesidad de un trasplante de riñón; además, no existe un tratamiento específico y el manejo de la patología consiste en medidas de soporte y se enfoca en evitar la progresión y en tratar los signos y síntomas asociados [23].

2.3 FACTORES ASOCIADOS A LA ERCnt

Se han generado hipótesis en los últimos años acerca de posibles factores asociados a esta patología, como la exposición a plaguicidas, repetidos episodios de deshidratación, ser hombre que trabaja en agricultura, pobreza, mordeduras de serpientes, infecciones, uso de agua de pozos, exposición a metales pesados y otros minerales, exposición a suelos de origen volcánico, el clima, bajas altitudes [19], [23]. A continuación, los principales.

2.3.1 Agricultura

La mayoría de las personas afectadas por esta patología, en los puntos de mayor prevalencia, se dedican a labores propias de la agricultura e incluso se ha encontrado que quienes trabajan en cultivos de caña tienen mayor probabilidad de tener una disminución acelerada de la tasa de función glomerular [24]. Dicho cultivo ha llamado mucho la atención de investigadores también porque predomina en gran parte de las regiones con mayor prevalencia [4].

Además, en la revisión de Nayak et al [24] se encontró que diversos estudios han demostrado que el uso de agroquímicos de esta actividad está asociado con el padecimiento de la ERCnt. Se debe tomar en cuenta que esta exposición no sólo puede afectar a las personas que trabajan directamente en el campo, sino, que también afecta a toda la comunidad debido al uso indiscriminado y excesivo [25]. No obstante, como menciona Valdivia *et al* [3], los datos derivados de algunos metaanálisis publicados concuerdan en una falta de asociación suficientemente concluyente entre químicos y pesticidas con el desarrollo de la enfermedad; de hecho, en los países en los que se presenta esta enfermedad cuenta con múltiples regiones

con agricultura extensiva y gran uso de agroquímicos, pero solo es en ciertos puntos en los que se presenta la ERCnt.

A pesar, de que se considera un posible factor y que las comunidades afectadas se dedican a la agricultura con extenso uso de agroquímicos, no se ha logrado establecer un contaminante común que pueda ser el causante y los pacientes no presentan intoxicaciones por agroquímicos [22].

2.3.2 Factores ambientales

Múltiples factores meteorológicos y topográficos parecen tener relación con la prevalencia de esta enfermedad. Desde que se comenzó a registrar esta afección, se ha notado que las zonas en las que se presenta la epidemia son de bajas elevaciones, calientes y relativamente cercanas a costas, por lo que se sugiere que el estrés térmico puede jugar un papel importante, ya que se suma el calor ambiental más el trabajo físico que suelen hacer los agricultores en sus jornadas; todo esto puede llevar a una pérdida de fluidos corporales y periodos de deshidratación. Un hallazgo prevalente en este grupo de personas es un elevado ácido úrico en sangre, relacionado a los repetidos episodios de deshidratación [22]. En la región centroamericana se ha encontrado una relación positiva entre la incidencia y la temperatura y el estrés térmico [26].

Adicionalmente, se ha observado la presencia de metales pesados en suelo, los cuales pueden infiltrarse a pozos de agua o bien ser inhalados o ingeridos a través del polvo [19]. Por ejemplo, varios estudios han encontrado una exposición crónica a metales pesados como cadmio, arsénico y plomo en las personas de estas comunidades a través de marcadores [24].

Es importante entender entonces las mecánicas que suceden en el suelo que causan el movimiento de este a la atmosfera y su posterior ingestión o inhalación. En el suelo existen tres fuerzas: la horizontal que es proporcional a una fuerza de resistencia y a la superficie expuesta de la partícula; la vertical ascendente que corresponde a la succión producida por diferencia de presión debajo y encima de la partícula; y la tercera fuerza es de carácter

estabilizador y es la que produce la gravedad. La movilización de las partículas se produce solamente cuando las primeras 2 superan la magnitud de las fuerzas estáticas, que mantienen a las partículas agrupadas y adheridas a la superficie del suelo [27].

Para que las partículas del suelo sean transportadas por el viento debe presentarse un tamaño específico de la primera y una velocidad suficiente del segundo. Cuando la velocidad del viento aumenta, las partículas de diámetro alrededor de 100 micras son las primeras que se mueven por arrastre fluido, esto provoca que la partícula choque con el suelo y se dé la saltación, donde básicamente la partícula se suspende en el aire. Las partículas entre 20 y 70 micras quedan suspendidas por corto tiempo mientras que las que son menores a 20 micras pueden permanecer por largos tiempos (semanas), por lo que, pueden ser transportados a miles de kilómetros de distancia de las regiones de origen [27]. Esto último sucede con el polvo proveniente del Sahara que ingresa al país [28].

2.3.3 Genética

Algunos estudios han señalado que este factor puede jugar un papel fundamental ya sea causal o de predisposición, debido a que se ha observado que recurre entre miembros de mismos núcleos familiares y la mayoría de los pacientes son de sexo masculino [22].

En un estudio genético llevado a cabo en India en pacientes de la ERCnt se ha encontrado una relación fuerte de la enfermedad con polimorfismos de nucleótido único relacionados (variaciones genéticas específicas) a los genes de NLRP4 y PRKN [3]. El primero genera un producto genético regulador negativo de la autofagia [29], la cual es un proceso auto degenerativo que elimina proteínas mal plegadas o agregadas, limpia orgánulos dañados y contribuye a la estabilidad del genoma [30]; también interfiere en la señalización del interferón Tipo 1 que desempeña un papel en la protección contra infecciones virales [29]. Las implicaciones del gen PRKN son menos conocidas, pero se conoce que regula la proteína parkina la cual es importante para la autofagia y la protección contra el estrés oxidativo [31].

A nivel epigenético se ha estudiado el rol que tiene la exposición de las personas a ciertas sustancias, como los metales pesados. En el estudio de Singh *et al* [32] se determinó que el estrés prenatal debido a bajas concentraciones de arsénico es suficiente para predisponer al padecimiento de ERC en hombres a edades tempranas. Además, se ha encontrado que el mecanismo por el cual se da el daño producto de la exposición de ese metal pesado a largo plazo es la transición epitelio-mesénquima en el cual las células epiteliales de los riñones asumen un fenotipo celular mesénquimo [33]. Por ello, se ha considerado la terapia epigenética como inhibidora de la fibrosis renal inducida por ese metal pesado [34].

2.4 SITUACIÓN EN COSTA RICA

Con respecto a la definición de caso sospechosos de ERCnt en Costa Rica se considera cuando paciente de entre 10-60 años con TFG < 60 ml/min/1.73m² sin la presencia de antecedentes asociados a la ERC y sin lesiones renales agudas [35], de acuerdo con el protocolo nacional de vigilancia de esta enfermedad.

Por otro lado, en el país, las muertes asociadas al sistema urinario, que incluye la ERCnt, pasaron a ocupar el puesto 13 en 2010 a la sexta posición de todas las causas de muerte en el 2014; además, la ERC pasó de tener la posición 23 dentro de las causas de muertes prematura en 1990 al tercer puesto en el 2014, lo que representa un aumento mayor al 350% [35].

La provincia de Guanacaste se ha identificado como la de más afectación en el país, donde la población tiene una probabilidad 2,5 veces mayor de morir por insuficiencia renal en comparación con el resto del país [7]. Asimismo, en la Figura 2.3 se muestra que de los diez cantones más afectados del país nueve pertenecen a esta provincia.

Cantón	
Cañas	34.52
Bagaces	28.86
Carrillo	22.54
Santa Cruz	19.14
Liberia	17.76
La Cruz	16.76
Hojancha	15.29
Abangares	13.53
Nicoya	13.02
Upala	10.91
Nandayure	10.19
Limón	8.31
Naranjo	8.17
Golfito	7.97
Osa	7.49
Tilarán	7.46
Turrialba	7.36
Alvarado	7.24
San José	7.18
Flores	7.12
Puntarenas	6.77
Alajuela	6.46
Jiménez	6.41
Tasa Nacional	6.37

Figura 2.3: Incidencia acumulada de mortalidad por ERC distribuidas por cantón de Costa Rica 2000-2016 [7].

Como se puede observar en la Figura 2.4, los hombres de Guanacaste son los principales afectados; sin embargo, las mujeres de Guanacaste también presentan un riesgo aumentado con respecto a las mujeres del resto del país. Las mujeres que se dedican a la agricultura en Guanacaste representan el 0,8% de toda la población femenina de la provincia, esto sugiere que hay un factor o varios factores implicados en la zona que no son la exposición directa a esa actividad productiva y que afecta a ambos sexos [4].

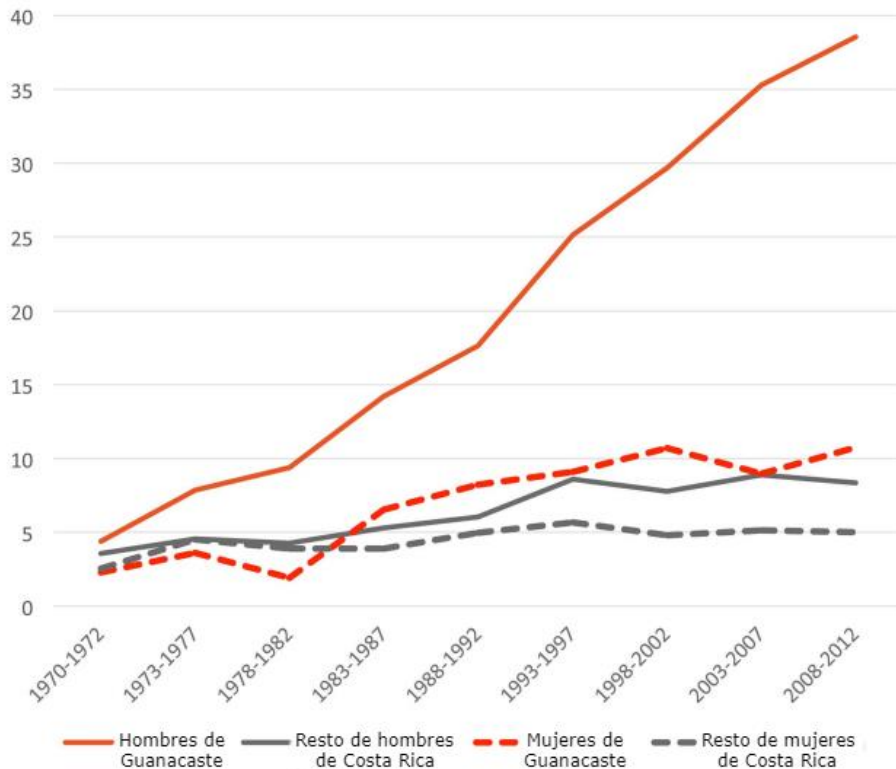


Figura 2.4: Tasas de mortalidad ajustada por edad por cada 100 000 habitantes a causa de la ERCnt en Guanacaste versus Costa Rica por periodos de 5 años entre 1970 y 2012 [4].

2.5 SITUACIÓN EN CARRILLO

El cantón de estudio se encuentra dentro de la zona de alta prevalencia de ERCnt de Costa Rica y, como se mencionó anteriormente, Carrillo es el tercero del país con la mayor incidencia acumulada de mortalidad por insuficiencia renal [7]. También, se puede notar en la Figura 2.5 que Carrillo cuentan con un riesgo relativo de mortalidad suavizado por esta enfermedad mayor de tres, la categoría más alta [4].

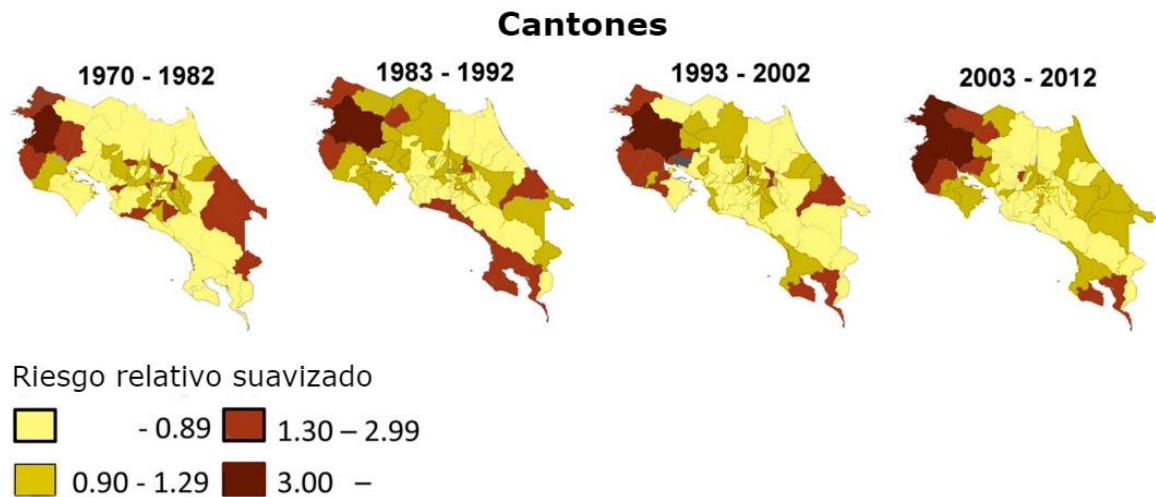


Figura 2.5: Riesgo relativo de mortalidad suavizado por ERCnt por cantones en hombres mayores a 20 en cuatro periodos desde 1970 a 2012 [4].

2.5.1 Factores de riesgo y características de la zona de estudio

2.5.1.1 *Cultivo de caña de azúcar*

El cantón de estudio pertenece al sector Oeste del área azucarera de Guanacaste, la de mayor producción del país, la región productiva cuenta con tres ingenios y Carrillo cuenta con uno [36]. Como se aprecia en la Figura 2.6, gran parte de los cultivos de caña de la provincia de Guanacaste se encuentran dentro de Carrillo. En este cantón la caña es el mayor cultivo en área con una 8290 ha, muy por encima del segundo cultivo que es el melón con 1200 ha [6].

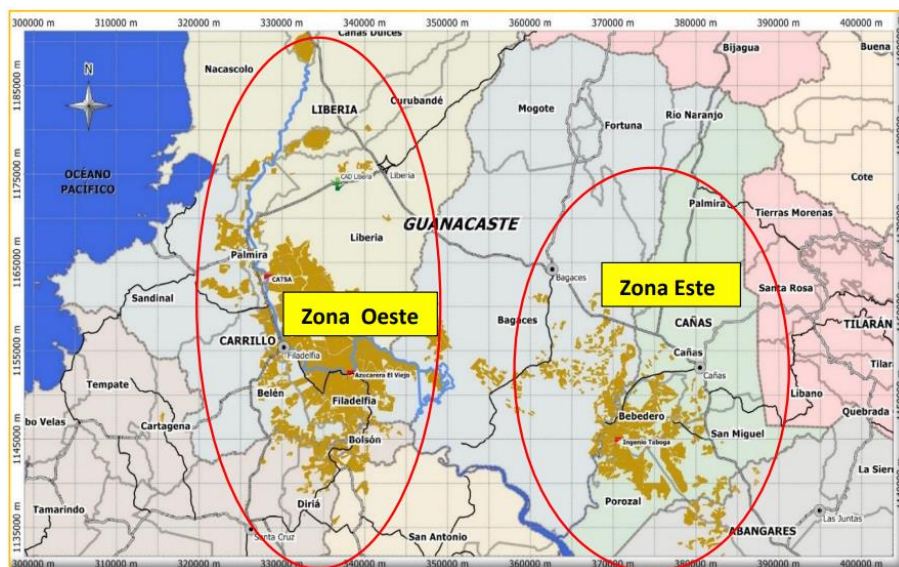


Figura 2.6: Distribución espacial de las zonas cañeras de la región de Guanacaste (Zonas Este y Oeste) [36].

2.5.1.2 Temperatura y viento

El viento tiene la capacidad de transportar material particulado de fuentes antropogénicas como la industria, el transporte y la quema; así como, de fuentes naturales como los incendios forestales, erupciones volcánicas y depósitos de materia fina. Este último es el caso del polvo del Sahara que es transportado en gran medida desde el Sahel hasta el Caribe por los vientos alisios, este se constituye de material particulado de un diámetro menor a las diez micras, las cuales pueden tener efectos nocivos para la salud de las personas [28].

La estación meteorológica de El Viejo, situada en el ingenio de Carrillo, ha proporcionado datos meteorológicos detallados para el periodo comprendido entre 2016 y 2019. Durante este lapso, las temperaturas promedio registradas oscilaron alrededor de los 28,8 °C. Además, se ha observado que las velocidades promedio del viento promedio durante ese mismo periodo fueron de 9,3; no obstante, esta cuenta con variaciones importantes ya que, durante los meses secos, con mayor influencia de los alisios, se presentan ráfagas de hasta 90 km/h y temporadas de lluvia, con menos viento, suele mantenerse por debajo de los 10 km/h [36].

2.5.1.3 Tipo de suelo

En Carrillo se encuentran alfisoles, vertisoles, entisoles, molisoles e inceptisoles; sin embargo, estos últimos dos son los de los de mayor presencia [6]. En el Cuadro 2.2 se puede apreciar las características principales de estos tipos de suelos.

Cuadro 2.2: Características y usos de los órdenes de suelo con mayor presencia en Carrillo [37].

Orden	Uso	Características
Alfisol	Actividades agrícolas como la siembra de café y caña de azúcar.	Su horizonte superficial es de color claro debido a la baja presencia de materia orgánica. También presenta translocación de partículas de arcilla y un buen drenaje
Entisol	Ganadería extensiva y siembra de arroz inundado	Proviene de fragmentación de rocas en llanuras de inundación o de montañas con erosión equilibrada. Aún en su profundidad presentan materia muy fina que dificulta el crecimiento reticular de plantas
Inceptisol	En una gran variedad de actividades agrícolas, entre ellas la caña de azúcar	Suelen presentarse en terrenos planos. Presentan materiales como arcilla amorfa y una gran cantidad de materia orgánica que se degrada fácilmente en climas cálidos
Molisoles	Cultivos herbáceos y arbóreos	Se forman en zonas semi áridas bajo pasturas. Tienen una buena estructura y son los suelos más fértiles, con alto contenido de materia orgánica
Vertisol	Siembra de arroz, algodón y caña de azúcar.	Son suelos muy arcillosos con facilidad de agrietamiento en temporadas secas. Son de color negro y profundos.

2.5.1.4 Presencia de metales pesados

El origen de metales pesados (cadmio, arsénico, plomo, mercurio, níquel, etc) puede ser debido a la actividad humana o la presencia natural en el suelo. Estos tienen la capacidad de inducir toxicidad renal que se caracteriza por inducir a una disfunción tubular que puede llevar a una enfermedad tubulointersticial, una de las características de la ERCnt [38]. En Costa Rica se encontraron cantidades de Arsénico superiores al límite establecido por la

normativa nacional en suministros de agua de consumo humano de las zonas afectadas en el pasado, lo cual en otras partes del mundo se ha señalado como un factor con fuerte relación con la prevalencia de la ERCnt [4]; sin embargo, en América Central no se han realizado suficientes estudios de bio marcadores al respecto [4]. En el caso de Cañas, Ulate [39] ha encontrado una mayor concentración de metales pesados en suelo y aire durante los meses secos de la región debido a la movilidad de estas sustancias dentro las matrices y entre ambas matrices que se ve aumentada en la presencia de fuertes vientos y bajas precipitaciones.

2.6 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN EL ANÁLISIS DE LOS FACTORES AMBIENTALES

Los SIG son herramientas que permiten crear, manejar, analizar y mapear una gama amplia de datos; de forma que estos conectan datos a mapas, integrando su información espacial con todo tipo de datos descriptivos. El beneficio que ofrecen estos sistemas es una mejor y más eficiente comunicación, así como una gestión y toma de decisiones mejoradas [40].

Estos sistemas pueden aplicarse a cualquier área del conocimiento y en las ciencias ambientales resultan especialmente útiles debido a que son una poderosa herramienta para visualizar datos espaciales y generar información que permita manejar un terreno y dar una mejor gestión a una problemática ambiental; las principales aplicaciones son el ordenamiento territorial, gestión de recursos naturales, infraestructura ambiental, estudio de contaminantes, cambio climático, estudios de impacto ambiental, análisis de fenómenos ambientales, entre otros [10].

De la misma forma, en la Salud y la epidemiología son herramientas que permiten un uso más efectivo de los datos disponibles, sobre todo cuando estos son escasos. En el caso de la ERCnt, se sugiere que se debe crear un registro de los pacientes con sus respectivos datos geográficos, usar datos de estudios de prevalencia anteriores o nuevos estudios de este tipo, de mayor alcance y estandarizados, de acuerdo con los criterios internacionales de la KDIGO para el diagnóstico de la ERCnt; de esta forma se puede explorar mejor la distribución de los

casos de prevalencia con posibles factores geográficos causantes o agravantes, lo que llevaría a un mejor manejo de la enfermedad en la salud pública de la población [22].

2.6.1 Clasificación supervisada de imágenes satelitales

Este es un método automático en el que se entrena a un modelo para clasificar los datos de acuerdo con el entrenamiento; es decir, el dominio espectral es segmentado en regiones que pueden asociarse con las clases o macro clases de coberturas del suelo, según la aplicación particular [41]. Las imágenes multiespectrales de sensores remotos que son utilizadas en la clasificación supervisada tienen la capacidad de brindar un mayor número de observaciones de cobertura que cualquier levantamiento terrestre [42]

Esta metodología ha sido instrumental en el monitoreo específico de los cultivos de caña desde hace más de 40 años. El aprendizaje automático, prescindiendo de etiquetas previas, ha demostrado su eficacia al identificar patrones y estructuras en datos agrícolas, siendo esencial para comprender el crecimiento y la expansión de los cultivos de caña. Esto ha beneficiado en gran medida la facilidad de la gestión de los recursos en zonas con fuerte presencia de la industria azucarera [43].

3 MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se llevó a cabo relacionando datos estadísticos epidemiológicos con factores ambientales y espaciales, mediante el análisis de variables mixtas (cuantitativas y no cuantitativas).

3.1 LUGAR DE ESTUDIO

Carrillo es el quinto cantón de la provincia de Guanacaste, su cabecera de cantón, Filadelfia, se encuentra en las coordenadas geográficas: 10.4451° N y 85.5510° O. Al norte limita con Liberia, este con Bagaces, al sur con Santa Cruz y al oeste con el Océano Pacífico. Tiene una extensión de $577,54 \text{ km}^2$ una altitud mínima y máxima de 0 msnm y 552 msnm , respectivamente [44]. Además, su territorio está dividido en cuatro distritos: Filadelfia, Palmira, Sardinal y Belén. En la Figura 3.1 se puede observar la distribución de estas subdivisiones.



Figura 3.1: Distritos de Carrillo con sus principales poblados y rutas. Fuente de capas: [45]

3.2 VISITAS DE CAMPO

Se realizaron dos visitas de campo. La primera se realizó como un reconocimiento a la zona de Carrillo y alrededores, además se tomaron muestras de suelo en puntos geográficos relacionados con la enfermedad para cuantificar metales pesados en una segunda parte de la investigación. En esta visita se habló con grupos de personas de Corralillo, Ortega, Filadelfia, Bolsón, Oriente y Cartagena; a ellos se les hizo preguntas acerca de su conocimiento de ERC en personas jóvenes y de las circunstancias en las que se presenta esta problemática en sus respectivos pueblos.

En la segunda visita tuvo lugar una reunión en el Laboratorio Clínico de la Clínica de Filadelfia con la Doctora Karol Matamoros quien dio orientación acerca de los parámetros para clasificar a un paciente con ERCnt. Además, se facilitaron parte de los datos que maneja el área de salud de Carrillo respecto a la incidencia de este padecimiento en la población del cantón, los cuales provienen de los nueve Equipos Básicos de Atención Integral en Salud (EBAIS) presentes en el cantón, así como referidos de otros centros de salud.

3.3 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Se filtraron los datos obtenidos de la visita en el software Excel de acuerdo con los parámetros brindados por la Dra Matamoros y bajo la guía del protocolo nacional de vigilancia de ERCnt del 2019.

3.3.1 Prevalencia de la enfermedad

Acorde a la filtración de datos realizada, basada en los parámetros del Cuadro 3.1 se obtuvo el total de casos sospechosos para el cantón de Carrillo. La edad mínima corresponde a 15 años ya que es el límite inferior de la base de datos disponible. Con respecto la edad máxima esta fue ampliamente discutida con la Dra Matamoros y Ph.D. Virginia Montero y se decidió, guiándose en la literatura, 50 años como límite superior, ya que entre los 50 y los 65 años existe una zona “gris” a la hora de clasificar la ERCnt.

Cuadro 3.1: Parámetros tomados en cuenta para la filtración de los casos de ERC a casos sospechosos de ERCnt.

Parámetro	Valor
Edad	15-50 años
Creatinina	1.3 y 1.1 mg/dL en hombres y mujeres respectivamente
Tiempo de daño sostenido	Al menos 3 meses
Sexo	Masculino y femenino por separado

Según lo conversado con la Dra Matamoros, más parámetros se deben tomar en cuenta para determinar con certeza que se trata de un caso de ERCnt; sin embargo, la base de datos de la CCSS no cuenta con esta información ya que posteriormente los pacientes son tratados en el área de nefrología y esos datos no se registran. Para efectos de mostrar un panorama general del comportamiento de esta enfermedad en el cantón se asumió que los casos sospechosos corresponden a la enfermedad.

Posteriormente se procedió a calcular la tasa de prevalencia por cada 100 000 habitantes para cada distrito de carrillo mediante la Ecuación 3.1. Esta tasa es la correspondiente para el periodo 2019-2023 que es el mismo en el que estaban disponibles los datos del área de salud de Carrillo.

$$Tasa\ de\ prevalencia = \frac{Personas\ enfermas}{Población\ total} \times 100\ 000$$

Ecuación 3.1

Por último, para la población de cada distrito se utilizaron los últimos datos que dispone el INEC para el año 2022.

3.3.2 Mortalidad de la enfermedad

Los datos de mortalidad los maneja el INEC, para obtener las defunciones asociadas a ERCnt se conversó con un agente de esta institución quien dio guía a la hora de utilizar la herramienta Redatam⁷ la cual genera cuadros programados con las estadísticas deseadas. Se

seleccionó el periodo de tiempo más amplio que permitiera el software, siendo este 2021-2022, se buscó el mismo rango de edades que en la sección 3.3.1 y se separó por distritos. Los códigos utilizados fueron los siguientes: N180, N183, N185 y N189.

Con ello se procedió a calcular una tasa de mortalidad que relaciona las defunciones con la población total, como se muestra en la Ecuación 3.2.

$$Tasa\ de\ mortalidad = \frac{Defunciones}{Población\ total} \times 100\ 000$$

Ecuación 3.2

3.4 ELABORACIÓN DE LOS MAPAS

Los mapas son los productos principales de esta investigación debido a su utilidad en la visualización de los datos en el espacio. Para crear los mapas se cargó la información generada anteriormente en formato de capas vectoriales o ráster (según el caso) al software libre QGIS en su versión 3.28.4 y se utilizaron las funciones que se detallan en el Cuadro 3.2.

Cuadro 3.2: Herramientas de QGIS utilizadas y su función [46].

Herramienta	Función
Añadir capa vectorial	Añade una capa de tipo vectorial al proyecto.
Añadir capa ráster	Añade una capa de tipo ráster al proyecto.
Añadir capa WFS	Permite conectar con las capas vectoriales que ofrece el SNIT.
Añadir capa WMS	Permite conectar con las capas ráster que ofrece el SNIT.
Cortar	Corta una capa vectorial utilizando los objetos espaciales de una capa poligonal adicional.
Cortar ráster por capa de máscara	Corta cualquier ráster GDAL soportado por una capa vectorial de máscara.
Curvas de nivel	Extrae líneas de contorno a partir de cualquier ráster de elevaciones compatible con GDAL.
Reproyectar capa	Cambia el sistema de referencia de coordenadas

Para construir los mapas de relieve se acudió a los servicios de ASF Data Search de la NASA, el conjunto de datos seleccionados fue el del satélite PALSAR, de la misión ALOS de la JAXA, el cual dispone de modelos de elevación digital (MED) tomados desde el año 2006 hasta el 2011. Se escogió el modelo de mejor ajuste a la zona de estudio, del año 2008. También, como apoyo gráfico, fue utilizado el MED2017 de Costa Rica que ofrece el Instituto Geográfico Nacional (IGN) en sus servicios OGC.

Los mapas de temperatura fueron hechos a través de Google Earth Engine con las imágenes satelitales de MODIS, específicamente del MOD11A1 el cual tiene una resolución espacial de un kilómetro. Se escogió la banda LST diurna.

3.4.1 Clasificación supervisada en QGIS

Para realizar la clasificación supervisada de imágenes de teledetección se instaló el complemento Semi Automatic Classification 8.0.3 y la librería de Python Remotior-sensus. Se seleccionó una imagen satelital del Landsat 9, con fecha de captura de abril del 2023 y una cobertura de nubes menor al 10%. Se utilizaron las primeras siete bandas disponibles.

Para llevar a cabo el entrenamiento del sistema se hicieron al menos diez polígonos por macro clase, excepto para cuerpos de agua ya que sólo hay dos cuerpos de agua considerables en el área de estudio. Asimismo, para poder visualizar mejor las características de la zona, se usaron las combinaciones de bandas para la capa de composición roja-verde-azul (RGB) que se muestra en el cuadro 3.3. Finalmente, el algoritmo escogido para la clasificación fue el de máxima probabilidad.

Cuadro 3.3: Combinaciones RGB de las bandas de la imagen satelital usadas para los diferentes análisis visuales durante el entrenamiento [47].

Análisis visual	RGB (combinación de bandas)
Color natural	4-3-2
Urbano	7-6-4
Infra rojo (vegetación)	5-4-3
Agricultura	6-5-2
Vegetación sana	5-6-2
Tierra/agua	5-6-4
Natural con remoción atmosférica	7-5-3
Infrarojo de onda corta	7-5-4
Vegetación (variedades)	6-5-4

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 INDICADORES EPIDEMIOLÓGICOS

Con respecto a esta enfermedad, interesa conocer la distribución etaria de los afectados, el sexo, el número de casos activos, la incidencia y las defunciones; ya que con estas estadísticas se puede hacer un reconocimiento epidemiológico básico. Por ello se recurrió a indagar los datos disponibles en las distintas instancias gubernamentales competentes.

Primeramente, de las 1443 entradas conseguidas de la base de datos, se filtraron un total de 304 casos sospechosos, de ERCnt para el cantón de Carrillo en un periodo de cuatro años (2019-2022). De estos, 220 corresponde a pacientes masculinos y 84 a pacientes femeninas; es decir, un 72,37% y un 27,63% respectivamente. En la Figura 4.1 se puede observar la distribución de los grupos etarios, donde casi el 60% de los hombres y el 70% de las mujeres afectadas tienen más de 40 años. Además, destacan los grupos de 15-24 ya que es una población muy joven para una enfermedad de este tipo.

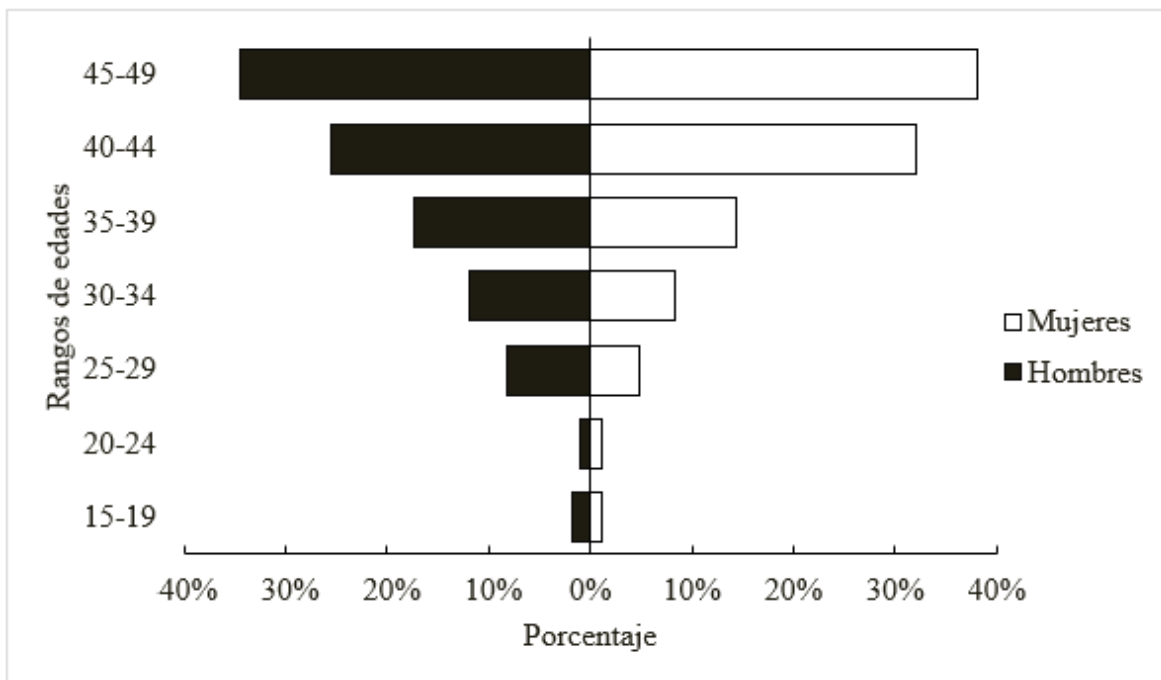


Figura 4.1: Frecuencias de casos sospechosos de ERCnt según grupo etario para hombres y mujeres, en el cantón de Carrillo en los años 2019-2022.

Estos resultados coinciden con los obtenidos en el pasado en Costa Rica [4] ya que la mayoría de los casos son hombres. También, en otras regiones del mundo se ha encontrado que la prevalencia aumenta con la edad [48], del mismo modo sucede en Carrillo, pero esta variable es considerable en los grupos que van desde los 25 hasta los 39 años.

Cada uno de estos datos filtrados proviene referido de alguno de los nueve EBAIS de Carrillo, es decir, de la atención primaria. Normalmente las personas recurren a este servicio cuando ya presentan síntomas, en etapas avanzadas de la enfermedad, como se explicó en la sección 2 de este trabajo; asimismo, existe la posibilidad que el hallazgo se haga por coincidencia en una prueba rutinaria.

Por otra parte, se filtraron todos los casos sospechosos y el número de muertes relacionadas a ERCnt por cada distrito del cantón de Carrillo, como se puede observar en el Cuadro resumen 4.1

Cuadro 4.1: Resumen de los resultados obtenidos producto de la filtración de datos de prevalencia y de mortalidad de la ERCnt para los cuatro distritos de Carrillo.

Distrito	Población	Casos sospechosos^a	Defunciones^b ERCnt
Filadelfia	8 711	105	18
Palmira	6 445	46	8
Belén	10 982	72	13
Sardinal	18 909	81	6
Total	45 047	304	45

^aperíodo 2019-2022. ^bperíodo 2021-2022.

Es posible observar que Filadelfia es el distrito con mayor número de casos sospechosos y de muertes asociadas a la ERCnt, aunque su población es pequeña en comparación. Es decir, esta afección no impacta de forma homogénea dentro del cantón y existen variaciones considerables al trasladarse pocos kilómetros dentro de Carrillo. Este comportamiento podría

ser el reflejo de la naturaleza de la ERCnt ya que como se ha mencionado en el capítulo 2 de este trabajo y como sugiere el autor García *et al* [22] su causa está asociada a factores geográficos y ocupacionales.

Por tanto, se puede ver como la tendencia en Carrillo con respecto a la distribución de edades y de sexo es coincidente con la realidad en otras partes del país y del mundo. A continuación, se presentan figuras y cuadros que detallan de una manera más gráfica cómo estos resultados se ven relacionados con los factores geográficos asociados.

4.2 TASAS DE MORTALIDAD Y PREVALENCIA

A partir de los resultados anteriores es posible calcular las tasas de prevalencia y mortalidad para cada distrito de Carrillo las cuales se usan para relacionar los indicadores a la población de cada territorio, de forma que se pueden hacer comparaciones. En la figura 4.2 se muestra que tanto para la tasa de prevalencia 2019-2022 como para la tasa de mortalidad 2021-2022 se cumple un mismo comportamiento de afectación en los distritos de Carrillo, con el siguiente orden decreciente: Filadelfia, Palmira, Belén y Sardinal.

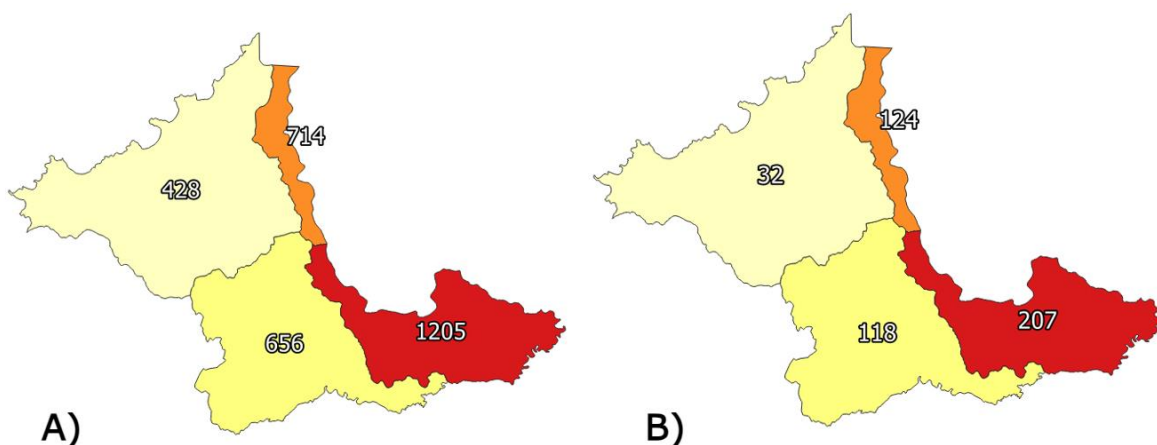


Figura 4.2: Distritos de Carrillo según sus tasas, ajustadas a 100 000 habitantes, de A) prevalencia (2019-2022) y B) mortalidad (2021-2022). En rojo Filadelfia, en naranja Palmira, en amarillo Belén y en crema Sardinal.

Aunado a lo anterior, al comparar el número de casos sospechosos contra la población de Carrillo de 15 a 50 años (rango de estudio), que es de 24 885 para el 2022, se tiene que un 1,22% de este grupo etario presentan la enfermedad en el cantón.

Es necesario entonces explorar los factores que podrían causar estas diferencias tan marcadas entre los distritos del cantón de estudio, donde, por ejemplo, el distrito de menor extensión, Palmira, tiene una mortalidad 3.9 veces mayor que el distrito más extenso, Sardinal. En las siguientes secciones de esta discusión se hace dicha exploración.

4.3 FACTORES GEOGRÁFICOS

4.3.1 Clima

4.3.1.1 Temperatura

El cantón de Carrillo cuenta con una temperatura promedio histórica de 27,8 °C y una máxima promedio de 33,0 °C, los meses más calientes coinciden con la época seca de la zona, como se observa en la Figura 4.3.

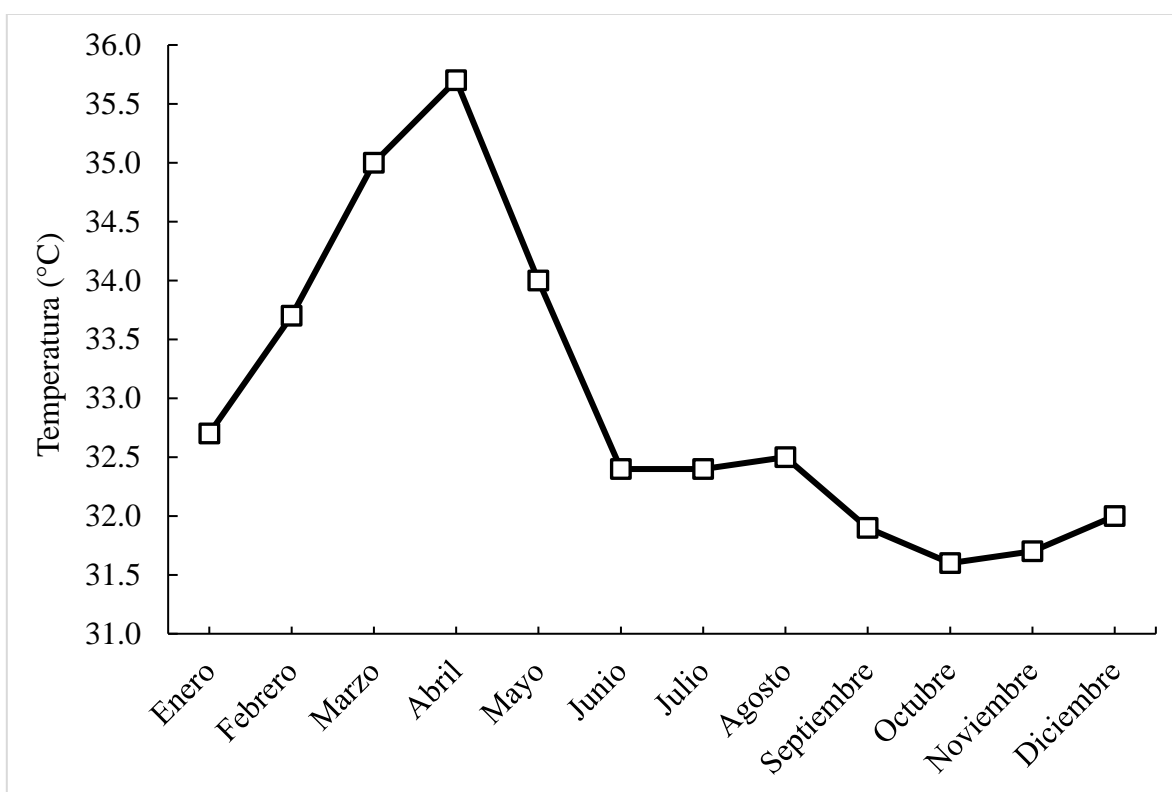


Figura 4.3: Temperaturas máximas promedio de la estación meteorológica de La Guinea, Carrillo, en el periodo 1970-2006.

Comparando estas condiciones con la realidad del país, se puede notar en la Figura 4.4 que el cantón de estudio se ubica en una de las zonas más calientes del país, el oeste de Guanacaste. Dichas condiciones se han asociado a la incidencia de la ERCnt, ya que aumentan la probabilidad de sufrir estrés térmico y deshidratación [24]. Carrillo comparte esta característica con otros países del mundo, donde sus puntos de mayor incidencia también se encuentran en las zonas más calientes de su respectivo país [24], [49], [50]. Aunque esto no prueba que sea un factor causal; incluso, en otros estudios se ha concluido que la temperatura como factor aislado no influencia la ocurrencia de la enfermedad y más bien se puede relacionar a variables que se suelen presentar en zonas calientes [51], [52].

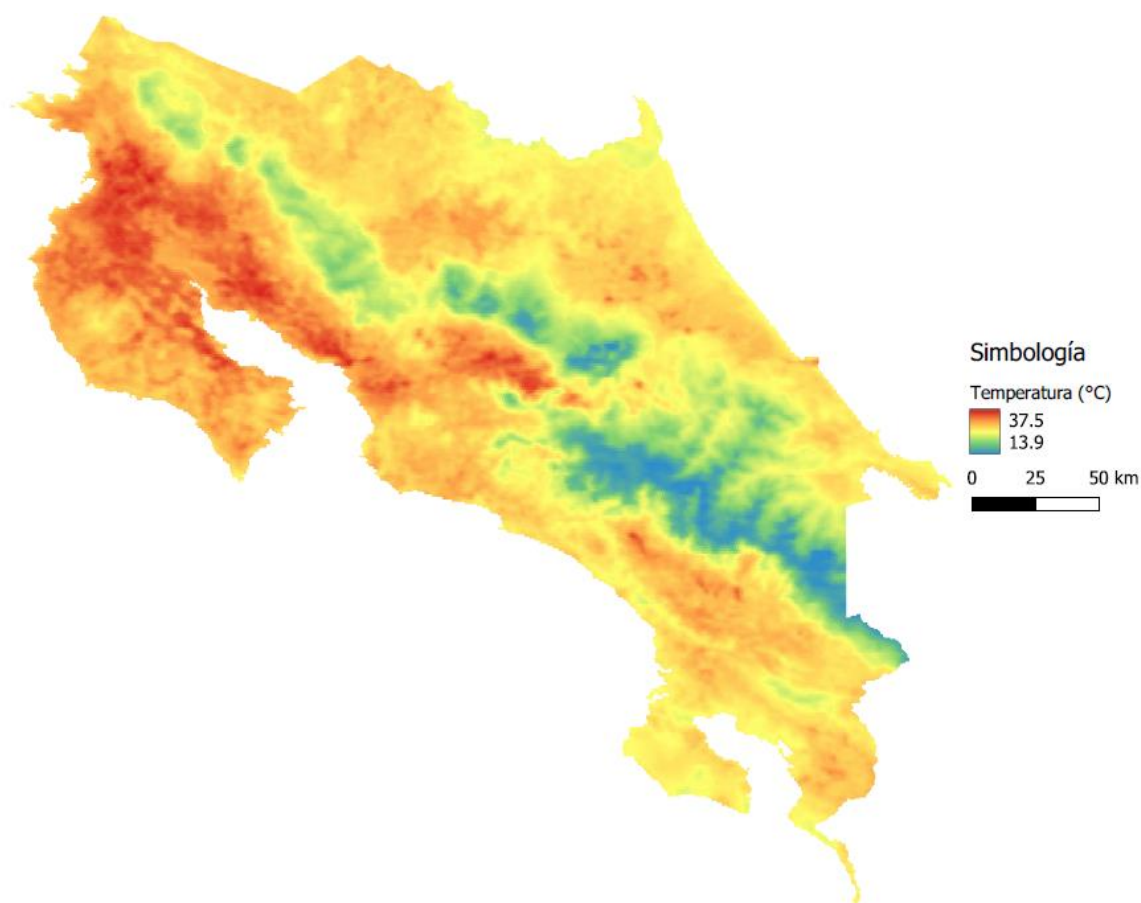


Figura 4.4: Temperatura superficial diurna, en Celsius, de Costa Rica durante los años 2019-2022 calculada a partir de las imágenes satelitales MODIS.

En Carrillo es posible observar una proporcionalidad ya que los distritos con mayor temperatura superficial, en su total de extensión, son los que mayores tasas de prevalencia y mortalidad demuestran; siendo estos Filadelfia y Palmira, como se observa en la figura 4.5.

Además, la temperatura superficial sirve para indicar los niveles de calor a los que se exponen las personas que están en contacto directo [53] lo cual debe considerarse para quienes trabajan en actividades de riesgo mayor como lo es la agricultura o la construcción.

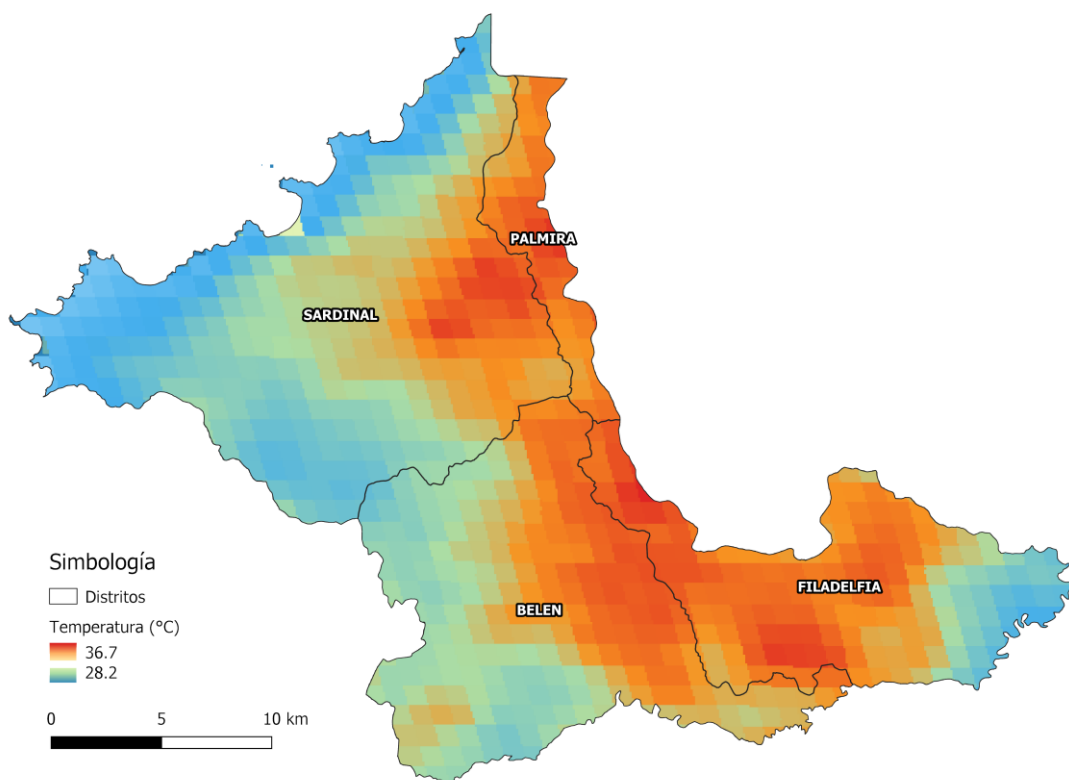


Figura 4.5: Temperatura superficial diurna, en Celsius, de los distritos de Carrillo durante los años 2019-2022 calculada a partir de las imágenes satelitales MOIDS.

Cabe resaltar que, al ser mapas de temperatura superficial construidos a base de imágenes satelitales, no sólo intervienen los factores convencionales de la temperatura del aire, sino que también la cobertura del suelo, lo cual es detallado posteriormente.

4.3.1.2 Precipitación y humedad

Carrillo se ubica en la zona con menores precipitaciones del país, tanto en cantidad como en frecuencia, con un promedio de 115 días de lluvia al año, como se muestra en la Figura 4.6. La precipitación anual total es de 1735,6 mm, con una gran variación en estaciones, ya que en los meses secos el promedio es de tan solo 6,3 mm mensuales y en los meses lluviosos es

de 257,4 mensuales. Además, la humedad relativa varía de un 62,5 en marzo hasta un 80,3 en junio, con un promedio de 73,6, de acuerdo con los datos históricos de la estación meteorológica de La Guinea, ubicada en el distrito de Filadelfia.

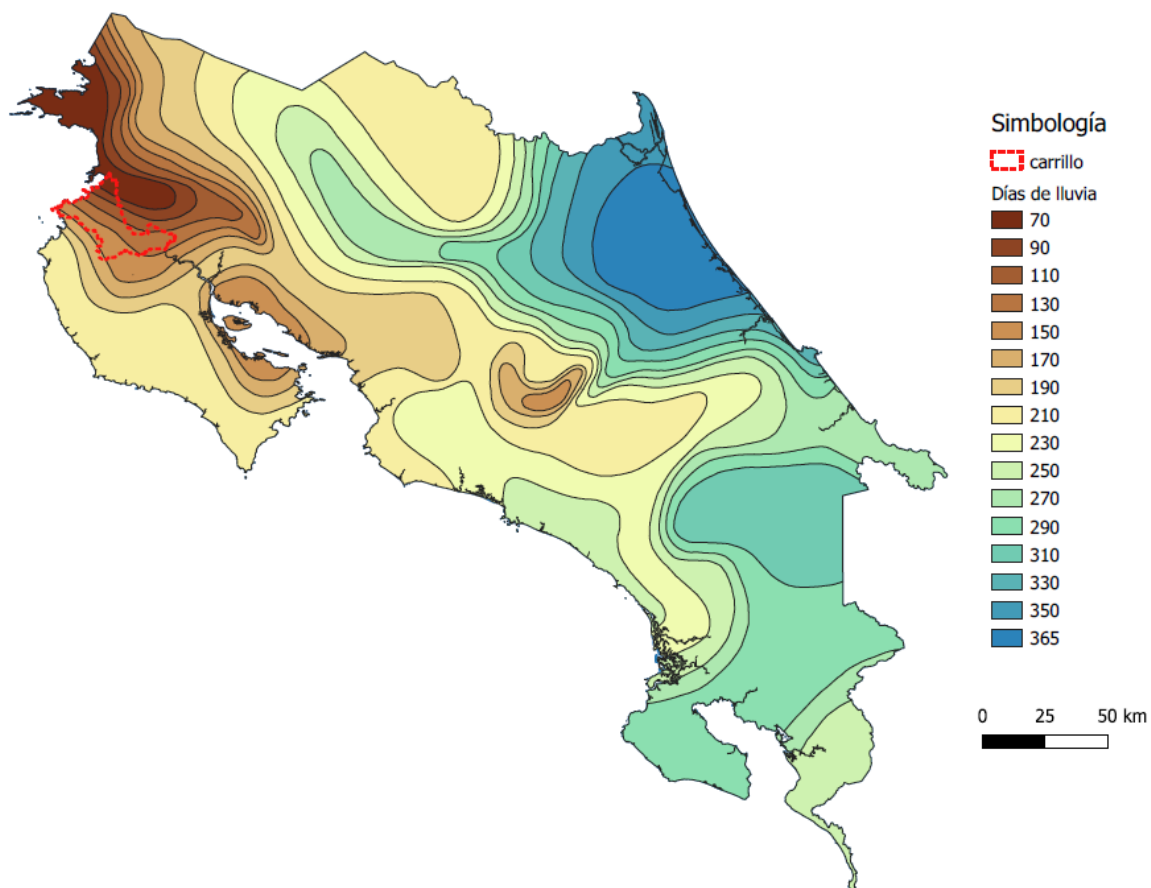


Figura 4.6: Días de lluvia en el territorio nacional, con respecto, con Carrillo delimitado. Fuente de capas: [54]

Con esto se puede deducir que el cantón tiene un clima húmedo, con una estación seca bastante marcada, que presentan sequías, y una estación lluviosa abundante. Característica común de otros sitios donde se presentan los puntos calientes de este problema de salud pública [55].

4.3.2 Suelos

Los órdenes de suelos en carrillo son bastante variados, como se ve en la Figura 4.7, con una gran presencia de alfisoles, vertisoles, molisoles e inceptisoles. En las partes montañosas de Belén y Sardinal se observa una mayor presencia de alfisoles, entisoles y también inceptisoles. Mientras que en la mayoría del área de Palmira y Filadelfia se encuentran Mollisoles e inceptisoles. Estos dos órdenes son ideales para el cultivo de la caña de azúcar; sin embargo, en periodos de sequía pueden propiciar al levantamiento de material particulado debido a la desecación y contracción que sufren en estas condiciones [37].

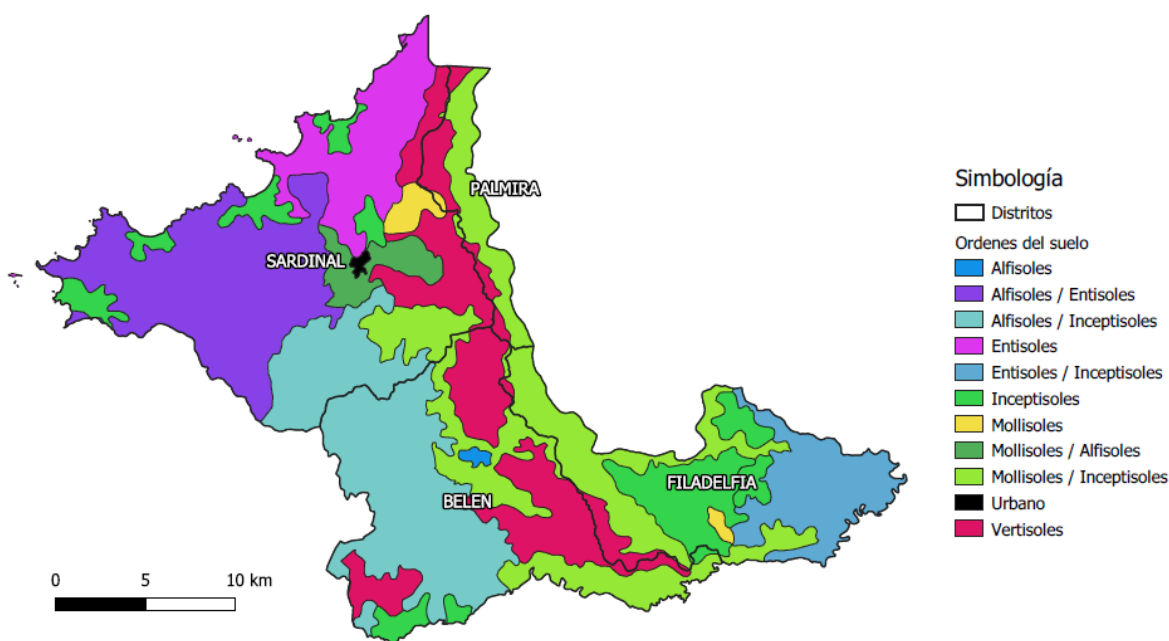


Figura 4.7: Ordenes de suelo presentes en el cantón de Carrillo. Fuente de capas: [54]

Por ello resulta importante conocer los patrones de viento y cómo son afectados por el relieve de la zona, cómo se demuestra en la siguiente subsección.

4.3.3 Relieve, vulcanismo y patrones de viento

La altitud máxima y mínima obtenidas del MED generado a partir de la imagen satelital del Landsat 9, disponibles en el Cuadro 4.2, se encuentran en el distrito de Sardinal; por otro

lado, los distritos de Filadelfia y Palmira son los que tienen menor rango de variación vertical. De los pueblos principales, los más bajos están en esos distritos también.

Cuadro 4.2: Altitudes máximas y mínimas de los distritos de Carrillo según el MED realizado, así como la altitud del pueblo principal de cada distrito.

Análisis visual	Altitud mínima (msnm)	Altitud máxima (msnm)	Altitud del poblado principal (msnm)
Filadelfia	4	183	21
Palmira	4	91	29
Sardinal	0	552	82
Belén	8	525	45

Además, al observar el relieve del cantón en la Figura 4.8 se puede notar que Sardinal y Belén presentan un terreno accidentado; contrario a la realidad de Palmira y Filadelfia donde hay mayor planicie. Estas zonas planas se ubican en su mayoría entre los 10 y los 60 msnm. Al igual que en los puntos calientes (*hotspots*) de otras zonas del mundo donde se presenta en zonas bajas y relativamente planas [56], donde se ha notado que conforme la elevación del terreno aumenta la prevalencia disminuye.

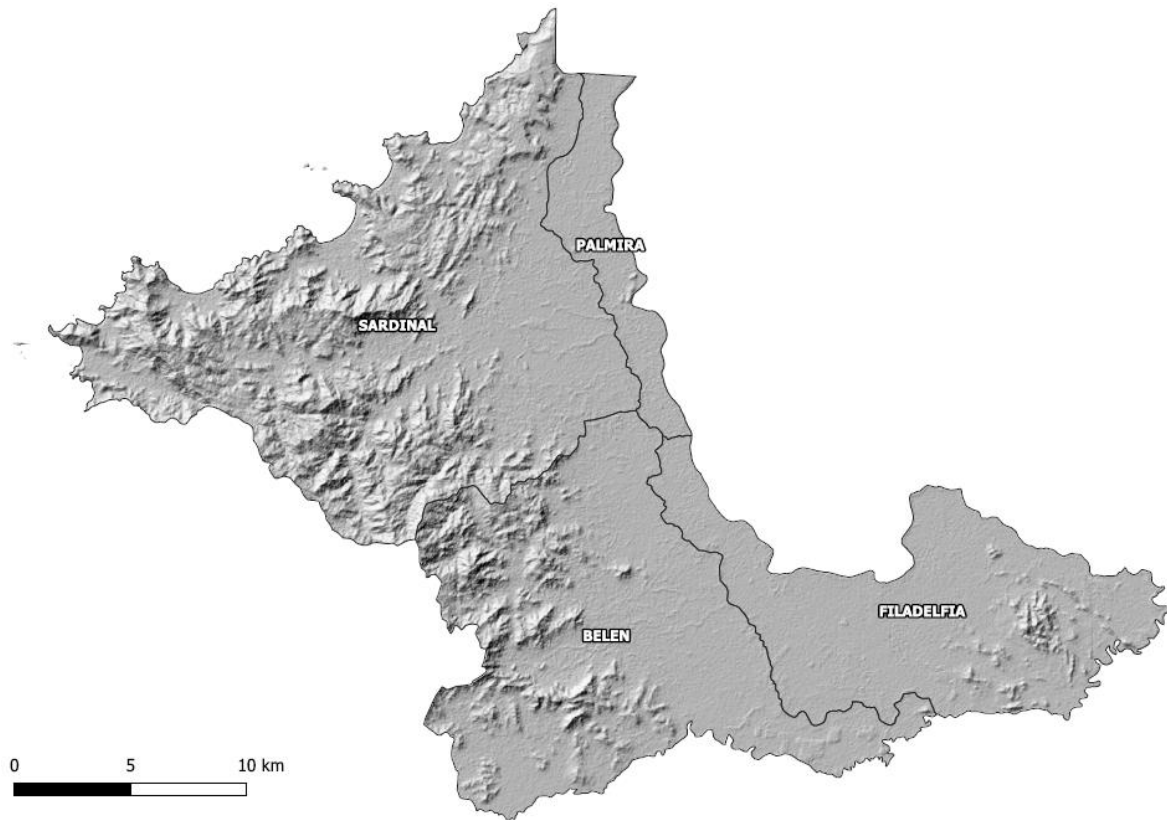


Figura 4.8: Relieve del cantón de los distritos del cantón de carrillo basado en un MED.

Al ver el relieve a una escala regional se pueden notar que entre Carrillo, Liberia, Bagaces y Cañas comparten una planicie continua que está irrigada por la cuenca baja del Río Tempisque. Esta zona se considera el punto caliente (*hotspot*) de la ERCnt de Costa Rica, por lo que las prevalencias en estos cantones vecinos también son elevadas [8], [9].

Dicha planicie se encuentra en una zona de influencia volcánica histórica, como se presenta en la Figura 4.9, la cual ha sido relacionada al depósito de sustancias nefrotóxicas en las capas del suelo como el cadmio y el arsénico. Estos contaminantes geogénicos pueden moverse fácilmente del medio suelo al medio acuático, muchas veces por la perforación de pozos que generan la ruptura de la roca, alcanzando depósitos de agua para consumo humano [57].

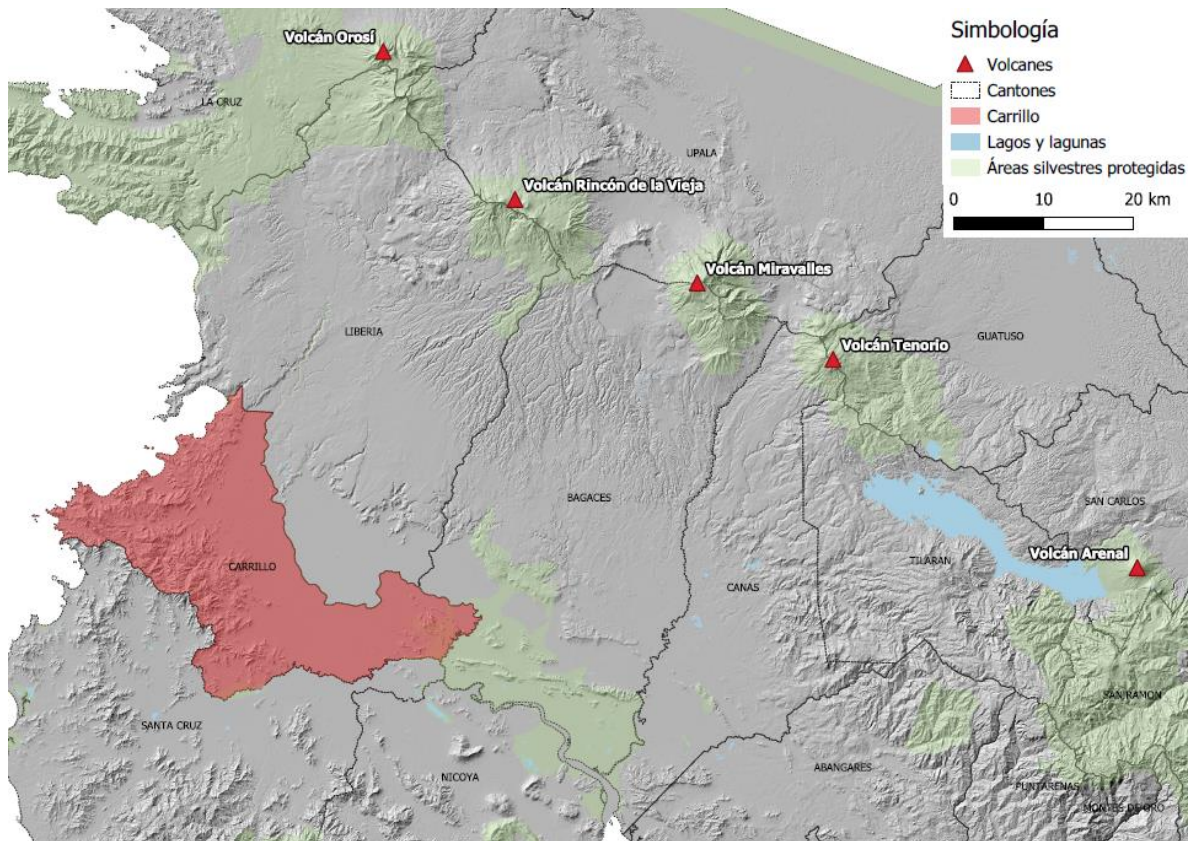


Figura 4.9: Volcanes de la cordillera volcánica de Guanacaste, Lago Arenal y relieve de la zona, con Carrillo resaltado.

Otro factor para considerar es la influencia de este relieve en los patrones del viento, un fenómeno muy notorio es el paso de masas de aire que se da a través del Lago Arenal que se observa en la Figura 4.9 donde se da un efecto de Venturi el cuál distribuye el viento hacia las zonas bajas de Guanacaste. Esto es especialmente cierto con la influencia de los vientos alisios en la temporada seca que empujan en dirección noreste-suroeste [58].

Con lo discutido anteriormente se puede deducir, también, la relación de este patrón de viento, en el cual es de mayor intensidad durante los meses secos, justo cuando los suelos de mayor presencia en Filadelfia y Palmira sufren una mayor desecación. Estos dos factores unidos se traducen en un mayor levantamiento del material particulado del suelo que puede ingresar con mayor facilidad al organismo a través de boca (geofagia accidental) [59].

4.3.4 Clasificación supervisada de Carrillo

Para obtener una clasificación más reciente de la cobertura del suelo de Carrillo se utilizó la metodología de clasificación supervisada mediante el entrenamiento específico para la realidad de esta zona. En la Figura 4.10 se puede observar la distribución de los usos de suelo del cantón. Llama la atención como los cultivos abarcan la mayor parte de Filadelfia, el distrito con las tasas de mortalidad y prevalencia más altas de Carrillo.

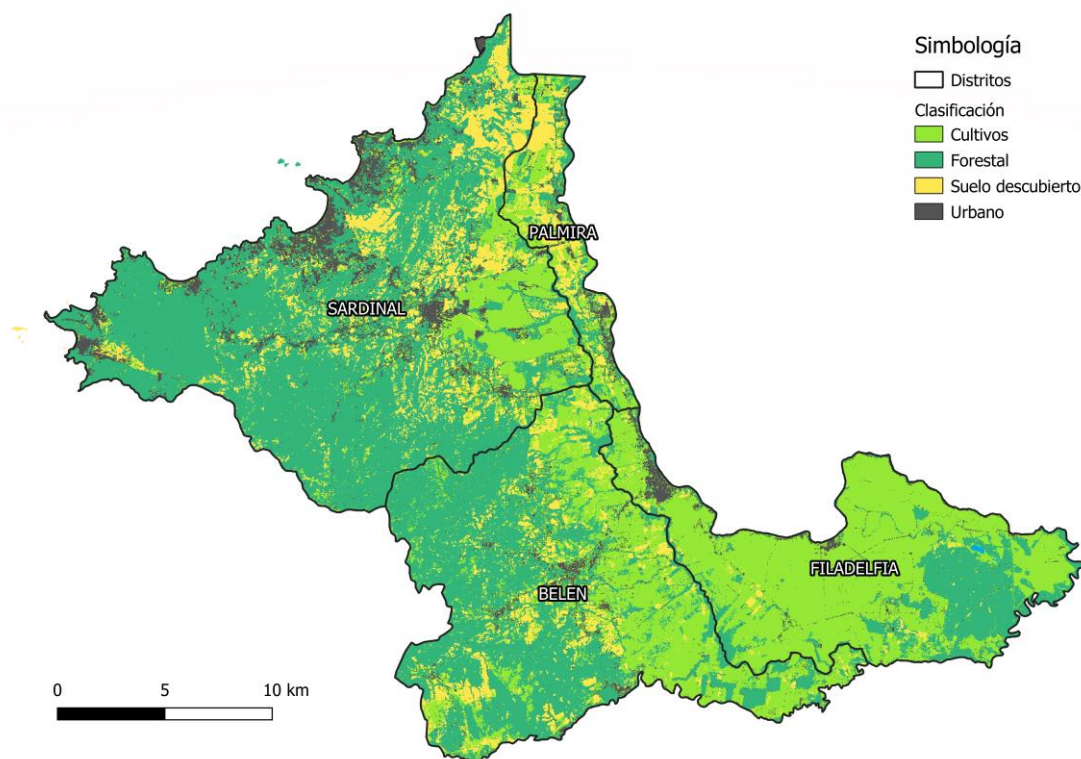


Figura 4.10: Cobertura del suelo de los distritos de Carrillo obtenidos mediante la clasificación supervisada de una imagen satelital Landsat 9 de abril del 2023.

Es importante destacar más del 70% de estos cultivos corresponden a la caña de azúcar [6] la cual ha sido asociada a la ERCnt, sobre todo entre los agricultores ya que ellos están más expuesto al estrés térmico, la deshidratación, metales pesados, material particulado producto de la quema, agroquímicos [38], [60], [61].

Es posible notar cómo este cultivo se asienta en las zonas más bajas, planas, calientes y cercanas al Río Tempisque el cual da soporte a los cultivos durante las sequías. Es en este sitio donde la caña cuenta con las condiciones perfectas para su correcto crecimiento, por ello es la zona con mayor cantidad de cultivos de caña del país [6].

Al relacionar la Figura 4.10 con la 4.5 se puede observar como el uso de la tierra afecta en gran medida la temperatura superficial, ya que las zonas con cultivos continuos presentan hasta 6°C de diferencia con respecto a zonas forestales en altitudes similares. Nuevamente, quienes se ven más afectados por esta situación son los trabajadores que se ven expuestos a estas condiciones.

Por otra parte, se puede notar como varios de los asentamientos urbanos del cantón están rodeados de cultivos, como es el caso de los pueblos de Filadelfia y Palmira. Esto quiere decir que estas comunidades tienen un mayor contacto con los factores asociados a esta actividad productiva, como lo es la presencia de material particulado por la quema de caña, el rocío de agroquímicos y el aumento de la temperatura.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Del total de casos sospechosos, más del 70% son hombres y más de la mitad de los pacientes tienen entre 35 y 50 años.

El impacto del ERCnt dentro de carrillo no es homogéneo y el distrito que presenta las tasas de mortalidad y prevalencia más altas es Filadelfia, seguido de Palmira, Belén y Sardinal.

La época más caliente del cantón coincide con la más seca, en la cual los vientos son más fuertes y se da una mayor exposición a la ingesta de material particulado debido a las actividades productivas y a la naturaleza del suelo de la zona, especialmente en Filadelfia y Palmira.

Los suelos presentes en la mayor parte de Filadelfia y Palmira son propensos a desecarse y alzar material particulado durante la época seca y más ventosa.

Filadelfia y Palmira son los distritos más planos, que cuentan con mayor proporción de cultivo de caña y en los cuales la temperatura superficial promedio es mayor.

Se logró generar un MED para Carrillo con una buena resolución que permite apreciar las características del relieve local y relacionarlo con la región de Guanacaste.

Se encontró que existe una relación entre la temperatura superficial y el uso del suelo, con una temperatura que varía considerablemente en curvas de nivel similares.

Se observó que los pueblos principales de cada distrito están rodeados de cultivos, en su mayoría de caña de azúcar.

El entrenamiento del modelo de clasificación supervisada fue exitoso y generó un mapa del uso del suelo del Cantón de estudio por medio del algoritmo de máxima probabilidad.

El cantón de Carrillo se encuentra en una zona donde convergen distintos factores ambientales que se han relacionado a la incidencia de la ERCnt como lo son la influencia volcánica histórica, el patrón de los vientos, el clima, la quema de caña de azúcar y la consecuente ingesta e inhalación de suelo que contiene metales pesados.

5.2 RECOMENDACIONES

Hacer una estrategia ambiental donde se planteen medidas de mitigación para reducir el riesgo toxicológico de la población, de acuerdo con las guías de KDIGO.

Analizar las muestras de suelo recolectadas de puntos estratégicos durante la primera visita de campo para conocer las concentraciones de sustancias nefrotóxicas.

Hacer un muestreo del material particulado presente en el aire durante los meses más ventosos del cantón para determinar la importancia de geofagia accidental.

Monitorear periódicamente el uso del suelo mediante los modelos de clasificación supervisada, con diferentes algoritmos para encontrar el de mejor ajuste al cantón.

Generar una campaña que dé más visibilidad a esta problemática a nivel nacional, eduque al respecto e incentive a la toma de consciencia. Ya sea de iniciativa pública o público-privada.

6 REFERENCIAS

- [1] V. M. Weaver, J. J. Fadrowski, y B. G. Jaar, «Global dimensions of chronic kidney disease of unknown etiology (CKDu): a modern era environmental and/or occupational nephropathy?», *BMC Nephrol*, vol. 16, n.º 1, p. 145, dic. 2015, doi: 10.1186/s12882-015-0105-6.
- [2] Y. Anupama, S. Sankarasubaiyan, y G. Taduri, «Chronic kidney disease of unknown etiology: Case definition for India – A perspective», *Indian J Nephrol*, vol. 0, n.º 0, p. 0, 2019, doi: 10.4103/ijn.IJN_327_18.
- [3] M. F. Valdivia Mazeyra, P. Muñoz Ramos, R. Serrano, M. Alonso Riaño, Y. Gil Giraldo, y B. Quiroga, «Nefropatía endémica mesoamericana: una enfermedad renal crónica de origen no tan desconocido», *Nefrología*, vol. 41, n.º 6, pp. 612-619, nov. 2021, doi: 10.1016/j.nefro.2021.03.005.
- [4] C. Wesseling *et al.*, «Mesoamerican nephropathy: geographical distribution and time trends of chronic kidney disease mortality between 1970 and 2012 in Costa Rica», *Occup Environ Med*, vol. 72, n.º 10, pp. 714-721, oct. 2015, doi: 10.1136/oemed-2014-102799.
- [5] V. Montero-Campos *et al.*, «Establishing a scenario of exposure to environmental toxins associated with nephropathies in agricultural areas of Costa Rica based on Geological Medicine», *Res Sq*, 2022.
- [6] Ministerio de Agricultura y Ganadería, «Caracterización del área de influencia de la agencia de extensión agropecuaria Carrillo», 2019.
- [7] Ministerio de Salud de Costa Rica, «Mortalidad por insuficiencia renal crónica: Costa Rica», 2017.
- [8] Marcela Quirós Lépiz, «Determinación del peor escenario de riesgo toxicológico de la insuficiencia renal crónica en Costa Rica basado en factores ambientales con relación al cultivo de caña de azúcar», ITCR, Cartago, 2015.
- [9] Oscar Ulloa Meza, «Desarrollo de un modelo preliminar sobre la incidencia de variables ambientales y geográficas en las tasas de prevalencia de la Nefropatía Mesoamericana en Costa Rica», ITCR, Cartago, 2018.
- [10] N. Mancipe y M. Sanabria, *Introducción a los SIG para futuras aplicaciones ambientales*, 1.ª ed. Bogotá: Universidad de La Salle, 2017.

- [11] Kidney Disease Improving Global Outcomes, «Improving Global Outcomes (KDIGO) 2012 Clinical Practice Guideline for the Evaluation and Management of Chronic Kidney Disease (CKD)», *Kidney Int Suppl* (2011), vol. 3, n.º 1, p. 3, ene. 2013, doi: 10.1038/kisup.2012.75.
- [12] Cleveland Clinic, «Kidney».
- [13] National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases, «Los riñones y su funcionamiento».
- [14] P. Romagnani *et al.*, «Chronic kidney disease», *Nat Rev Dis Primers*, vol. 3, n.º 1, p. 17088, nov. 2017, doi: 10.1038/nrdp.2017.88.
- [15] AKF's Medical Advisory Committee, «American Kidney Fund», Stages of kidney disease.
- [16] J.-J. Boffa y C. Cartery, «Insuficiencia renal crónica o enfermedad renal crónica», *EMC - Tratado de Medicina*, vol. 19, n.º 3, pp. 1-8, sep. 2015, doi: 10.1016/S1636-5410(15)72803-5.
- [17] J. Wijkström *et al.*, «Morphological and clinical findings in Sri Lankan patients with chronic kidney disease of unknown cause (CKDu): Similarities and differences with Mesoamerican Nephropathy», *PLoS One*, vol. 13, n.º 3, p. e0193056, mar. 2018, doi: 10.1371/journal.pone.0193056.
- [18] World Health Organization, *International Expert Consultation on Chronic Kidney Disease of Unknown Etiology*. WHO, 2016.
- [19] C. M. Orantes-Navarro *et al.*, «Toward a Comprehensive Hypothesis of Chronic Interstitial Nephritis in Agricultural Communities», *Adv Chronic Kidney Dis*, vol. 24, n.º 2, pp. 101-106, mar. 2017, doi: 10.1053/j.ackd.2017.01.001.
- [20] L. K. Krisher, J. Butler-Dawson, M. Dally, D. Jaramillo, y L. S. Newman, «Enfermedad renal crónica de causa desconocida: investigaciones en Guatemala y oportunidades para su prevención», *Ciencia, Tecnología y Salud*, vol. 7, n.º 1, may 2020, doi: 10.36829/63CTS.v7i1.884.
- [21] B. Valdés-Rodríguez, V. Montero-Campos, y M. G. Siebecker, «Causes of Chronic Kidney Disease of Non-Traditional Origin in Central America: An Approach Based on Medical Geology», *Geosciences (Basel)*, vol. 13, n.º 12, p. 360, nov. 2023, doi: 10.3390/geosciences13120360.

- [22] R. García-Trabanino *et al.*, «Nefropatía mesoamericana: revisión breve basada en el segundo taller del Consorcio para el estudio de la Epidemia de Nefropatía en Centroamérica y México (CENCAM)», *Nefrología Latinoamericana*, vol. 14, n.º 1, pp. 39-45, ene. 2017, doi: 10.1016/j.nefrol.2016.11.001.
- [23] M. Trigueros Daniel, G. Hernandez Sylvia, S. Brenes Gabriel, y S. Garita Francinny, «Nefropatía Mesoamericana», 2020.
- [24] S. Nayak *et al.*, «Factors Associated with Chronic Kidney Disease of Unknown Etiology (CKDu): A Systematic Review», *Healthcare*, vol. 11, n.º 4, p. 551, feb. 2023, doi: 10.3390/healthcare11040551.
- [25] G. Abraham, S. K. Agarwal, S. Gowrishankar, y M. Vijayan, «Chronic Kidney Disease of Unknown Etiology: Hotspots in India and Other Asian Countries», *Semin Nephrol*, vol. 39, n.º 3, pp. 272-277, may 2019, doi: 10.1016/j.semnephrol.2019.02.005.
- [26] R. Sippy *et al.*, «A national analysis of risk for potential chronic kidney disease of unknown etiology in Ecuador», *Práctica Familiar Rural*, vol. 5, n.º 2, jul. 2020, doi: 10.23936/pfr.v5i2.161.
- [27] F. Avecilla, «Mecanismos de emisión de partículas finas (PM10) por erosión eólica en suelos agrícolas de Argentina», Tesis de doctorado, Universidad Nacional del Sur, 2017.
- [28] IMN y MINAE, *Tópicos Meteorológicos y oceanográficos*, vol. 13. 2014.
- [29] NIH, «Gene Database», *NLRP4 NLR family pyrin domain containing 4 [Homo sapiens (human)]*. National Library of Medicine, 2023.
- [30] D. Glick, S. Barth, y K. F. Macleod, «Autophagy: cellular and molecular mechanisms», *J Pathol*, vol. 221, n.º 1, pp. 3-12, may 2010, doi: 10.1002/path.2697.
- [31] NIH, «Gene Database», *PRKN parkin RBR E3 ubiquitin protein ligase [Homo sapiens (human)]*. National Library of Medicine, 2023.
- [32] R. D. Singh *et al.*, «Prenatal arsenic exposure induces immunometabolic alteration and renal injury in rats», *Front Med (Lausanne)*, vol. 9, ene. 2023, doi: 10.3389/fmed.2022.1045692.

- [33] Y. Chang y K. P. Singh, «Arsenic induces fibrogenic changes in human kidney epithelial cells potentially through epigenetic alterations in DNA methylation», *J Cell Physiol*, vol. 234, n.º 4, pp. 4713-4725, abr. 2019, doi: 10.1002/jcp.27244.
- [34] K. Singh y Y.-W. Chang, «Nephrology News and Issues», *Low levels of arsenic may cause kidney disease, but existing drug could become key treatment*, 2019.
- [35] Dirección de Vigilancia de la Salud, *Protocolo nacional de vigilancia de la enfermedad renal crónica no tradicional*. Ministerio de Salud de Costa Rica, 2019.
- [36] A. Ángulo, M. Rodríguez, y M. Chaves, *Guía técnica cultivo caña de azúcar región: Guanacaste*. LAICA, 2020.
- [37] MAG, «Biblioteca Virtual - Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica», Suelos de Costa Rica.
- [38] J. Butler-Dawson *et al.*, «Environmental metal exposures and kidney function of Guatemalan sugarcane workers», *J Expo Sci Environ Epidemiol*, vol. 32, n.º 3, pp. 461-471, may 2022, doi: 10.1038/s41370-021-00292-x.
- [39] S. Ulate, «Cuantificación de metales pesados en aire y suelo y su posible relación con la prevalencia de Nefropatía Mesoamericana en el cantón de Cañas, Guanacaste, Costa Rica», ITCR, Cartago, 2022.
- [40] Esri, «What is a GIS?»
- [41] J. A. Richards, «Supervised Classification Techniques», en *Remote Sensing Digital Image Analysis*, Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 263-367. doi: 10.1007/978-3-030-82327-6_8.
- [42] G. Aarango, B. Branch, y F. Botero, «Clasificación no supervisada de coberturas vegetales sobre imágenes digitales de sensores remotos», *Rev Fac Nac Agron Medellin*, 2015.
- [43] S. S. Virnodkar, V. K. Pachghare, V. C. Patil, y S. K. Jha, «Application of Machine Learning on Remote Sensing Data for Sugarcane Crop Classification: A Review», 2020, pp. 539-555. doi: 10.1007/978-981-15-0630-7_55.
- [44] Municipalidad de Carrillo, «Municipalidad de Carrillo», Historia de Carrillo: Cantón Arqueológico de Costa Rica.
- [45] Instituto Geográfico Nacional, «SNIT Nodos», Nodos.
- [46] QGIS, «QGIS». 2023.

- [47] K. Butler, «ArcGIS Blog», *Band Combinations for Landsat 8*, 2023.
- [48] A. V. Ranasinghe *et al.*, «The incidence, prevalence and trends of Chronic Kidney Disease and Chronic Kidney Disease of uncertain aetiology (CKDu) in the North Central Province of Sri Lanka: an analysis of 30,566 patients», *BMC Nephrol*, vol. 20, n.º 1, p. 338, dic. 2019, doi: 10.1186/s12882-019-1501-0.
- [49] Z. E. Petropoulos *et al.*, «Climate Trends at a Hotspot of Chronic Kidney Disease of Unknown Causes in Nicaragua, 1973–2014», *Int J Environ Res Public Health*, vol. 18, n.º 10, p. 5418, may 2021, doi: 10.3390/ijerph18105418.
- [50] E. Figueroa-Solis, D. Gimeno Ruiz de Porras, M. Rojas-Garbanzo, L. Whitehead, K. Zhang, y G. L. Delclos, «Prevalence and Geographic Distribution of Self-Reported Chronic Kidney Disease and Potential Risk Factors in Central America», *Int J Environ Res Public Health*, vol. 20, n.º 2, p. 1308, ene. 2023, doi: 10.3390/ijerph20021308.
- [51] D. VanDervort, D. Lopez, C. Orantes, y D. Rodríguez, «Spatial Distribution of Unspecified Chronic Kidney Disease in El Salvador by Crop Area Cultivated and Ambient Temperature», *Original Research*, 2014.
- [52] P. M. C. S. De Silva *et al.*, «Occupational heat exposure alone does not explain chronic kidney disease of uncertain aetiology (CKDu) in Sri Lanka», *The Journal of Climate Change and Health*, vol. 8, p. 100143, oct. 2022, doi: 10.1016/j.jocl.2022.100143.
- [53] NASA, «NASA Earth Observatory», Land Surface Temperature.
- [54] E. Ortiz-Malavasi, «Atlas de Costa Rica 2014». ITCR, Cartago, 2014.
- [55] S. Parameswaran *et al.*, «A Newly Recognized Endemic Region of CKD of Undetermined Etiology (CKDu) in South India—“Tondaimandalam Nephropathy”», *Kidney Int Rep*, vol. 5, n.º 11, pp. 2066-2073, nov. 2020, doi: 10.1016/j.ekir.2020.08.032.
- [56] W. S. M. Botheju, J. A. Liyanage, y S. D. P. Kannangara, «The Groundwater Geochemistry and the Human Health Risk Assessment of Drinking Water in an Area with a High Prevalence of Chronic Kidney Disease of Unknown Etiology (CKDu), Sri Lanka», *J Chem*, vol. 2021, pp. 1-18, oct. 2021, doi: 10.1155/2021/1755140.
- [57] J. Bundschuh *et al.*, «Medical geology in the framework of the sustainable development goals», *Science of The Total Environment*, vol. 581-582, pp. 87-104, mar. 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.208.

- [58] IMN y MINAE, *Sobre Algunos Fenómenos meteorológicos de Costa Rica*.
- [59] S. A. Doabi, M. Karami, M. Afyuni, y M. Yeganeh, «Pollution and health risk assessment of heavy metals in agricultural soil, atmospheric dust and major food crops in Kermanshah province, Iran», *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 163, pp. 153-164, nov. 2018, doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.07.057.
- [60] M. H. Hathaway, C. L. Patil, A. Odhiambo, D. Onyango, y S. Dorevitch, «Prevalence and predictors of chronic kidney disease of undetermined causes (CKDu) in Western Kenya's "sugar belt": a cross-sectional study», *BMC Nephrol*, vol. 24, n.º 1, p. 157, jun. 2023, doi: 10.1186/s12882-023-03213-2.
- [61] A. D. Stem, K. L. Rogers, J. R. Roede, C. A. Roncal-Jimenez, R. J. Johnson, y J. M. Brown, «Sugarcane ash and sugarcane ash-derived silica nanoparticles alter cellular metabolism in human proximal tubular kidney cells», *Environmental Pollution*, vol. 332, p. 121951, sep. 2023, doi: 10.1016/j.envpol.2023.121951.

APÉNDICES

APÉNDICE 1: CÓDIGO PARA GENERAR MAPAS DE TEMPERATURA SUPERFICIAL

```
//Este código está en el lenguaje de programación JavaScript para Earth Engine
//Importar bordes nacionales
var dataset = ee.FeatureCollection('USDOS/LSIB_SIMPLE/2017');

//Seleccionar Costa Rica
var CostaRica = dataset.filter(ee.Filter.eq('country_na', 'Costa Rica'));

//Imprimir borde de CR
print(CostaRica);

//Agregar borde al mapa
Map.centerObject(CostaRica, 6);
Map.addLayer(CostaRica);

//Importar colección de imágenes
var modis = ee.ImageCollection('MODIS/006/MOD11A1');

//Definir rango de fechas
var inicio = ee.Date('2019-01-01');
var rango = ee.DateRange(inicio, inicio.advance(4, 'year'));

//Filtrar la colección para tener imágenes del rango
var mod11a1 = modis.filterDate(rango);

//Seleccionar la banda deseada
var modLSTday = mod11a1.select('LST_Day_1km');

//Kelvin a Celsius
var modLSTc = modLSTday.map(function(img) {
```

```
return img
.multiply(0.02)
.subtract(273.15)
.copyProperties(img, ['system:time_start']);
});
```

```
//Gráfica LST para CR
```

```
var ts1 = ui.Chart.image.series({
  imageCollection: modLSTc,
  region: CostaRica,
  reducer: ee.Reducer.mean(),
  scale: 1000,
  xProperty: 'system:time_start'})
.setOptions({
  title: 'Temperatura media 2019',
  vAxis: {title: 'Temperatura Celsius'}});
print(ts1);
```

```
//Calcular el promedio
```

```
var LSTcCortado = modLSTc.mean().clip(CostaRica);
```

```
//Agregar imagen cortada
```

```
Map.addLayer(LSTcCortado, {
  min:10, max:36,
  palette: ['white','blue', 'limegreen', 'yellow', 'darkorange', 'red']},
'Temperatura promedio');
```

```
// Definir los parámetros de exportación
```

```
var params = {
  image: LSTcCortado.toFloat(), // Convertir a tipo float para asegurar la precisión
  description: 'Temperatura', // Nombre del archivo
```



```
scale: 500, // Resolución en metros por píxel
region: CostaRica.geometry().bounds(), // Región de interés
maxPixels: 1e13 // Establecer el número máximo de píxeles permitidos
};

// Exportar la imagen a Google Drive
var task = Export.image.toDrive(params);

// Esperar a que la tarea esté completa
print('Exportando... Por favor espera.');
```

```
Task.waitForCompletion(task);

// Obtener el enlace para descargar
var link = task.getDownloadURL();
print('Enlace para descargar:', link);

//Fin
```

APÉNDICE 2: COMBINACIONES DE BANDAS MÁS RELEVANTES

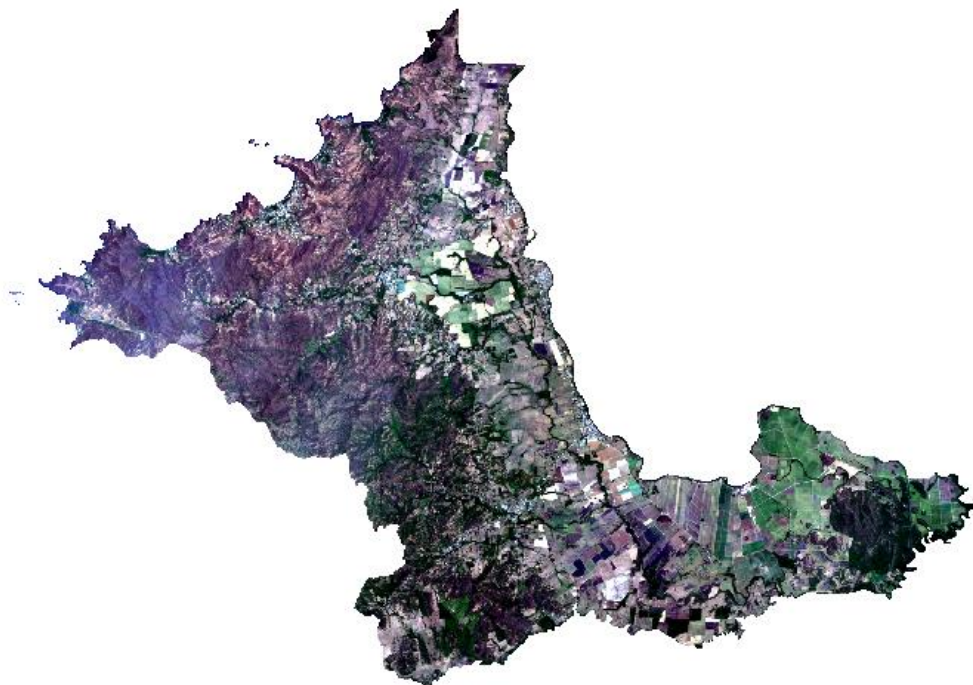


Figura A.2.1: RGB 4-3-2 para color natural

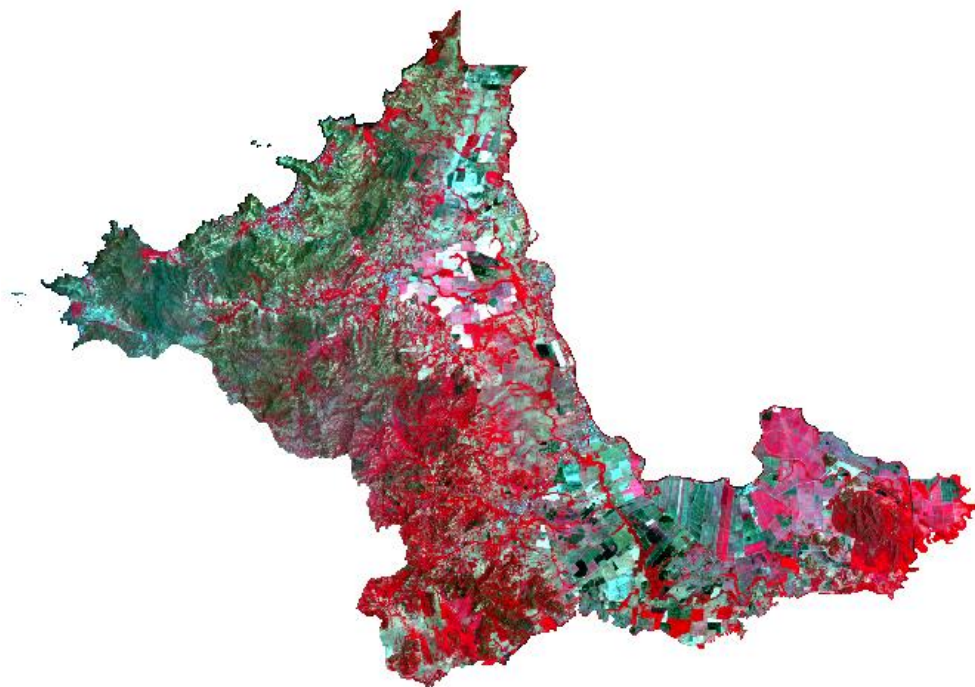


Figura A.2.2: RGB 6-5-2 para agricultura

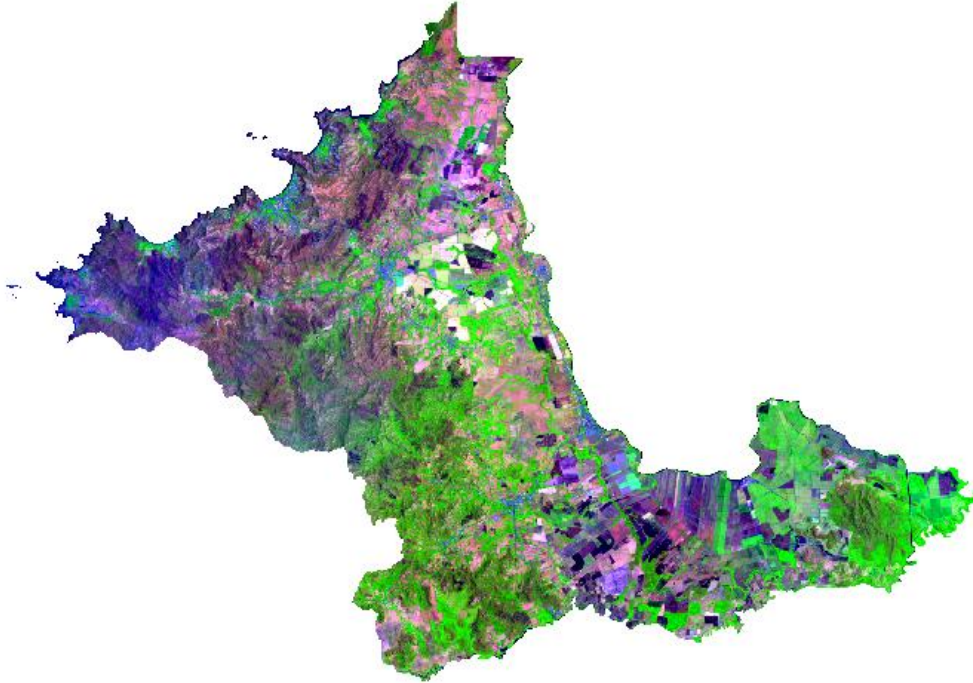


Figura A.2.3: RGB 5-6-2 para salud de la vegetación

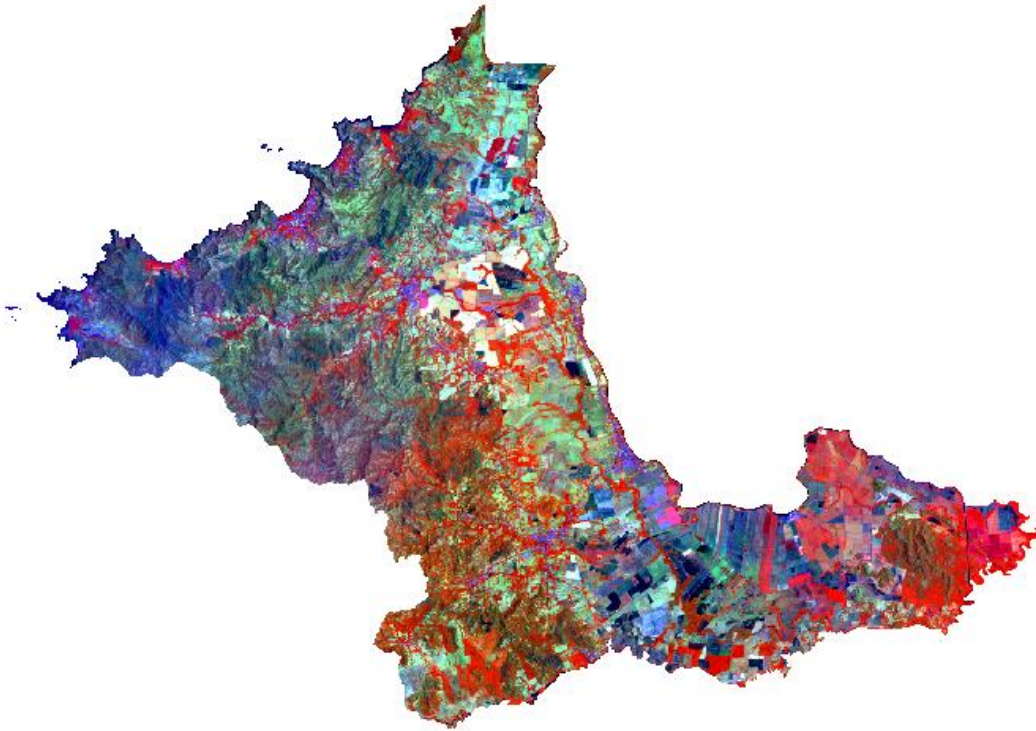


Figura A.2.4: RGB 5-6-4 para cuerpos de agua y tierra.

APÉNDICE 3: FOTOS DEL SUELO



Figura A.3.1: Foto de muestra de suelo recolectada al costado sur del salón comunal de Corralillo, Filadelfia.

ANEXOS

ANEXO 1: TÉCNICA DE CLASIFICACIÓN

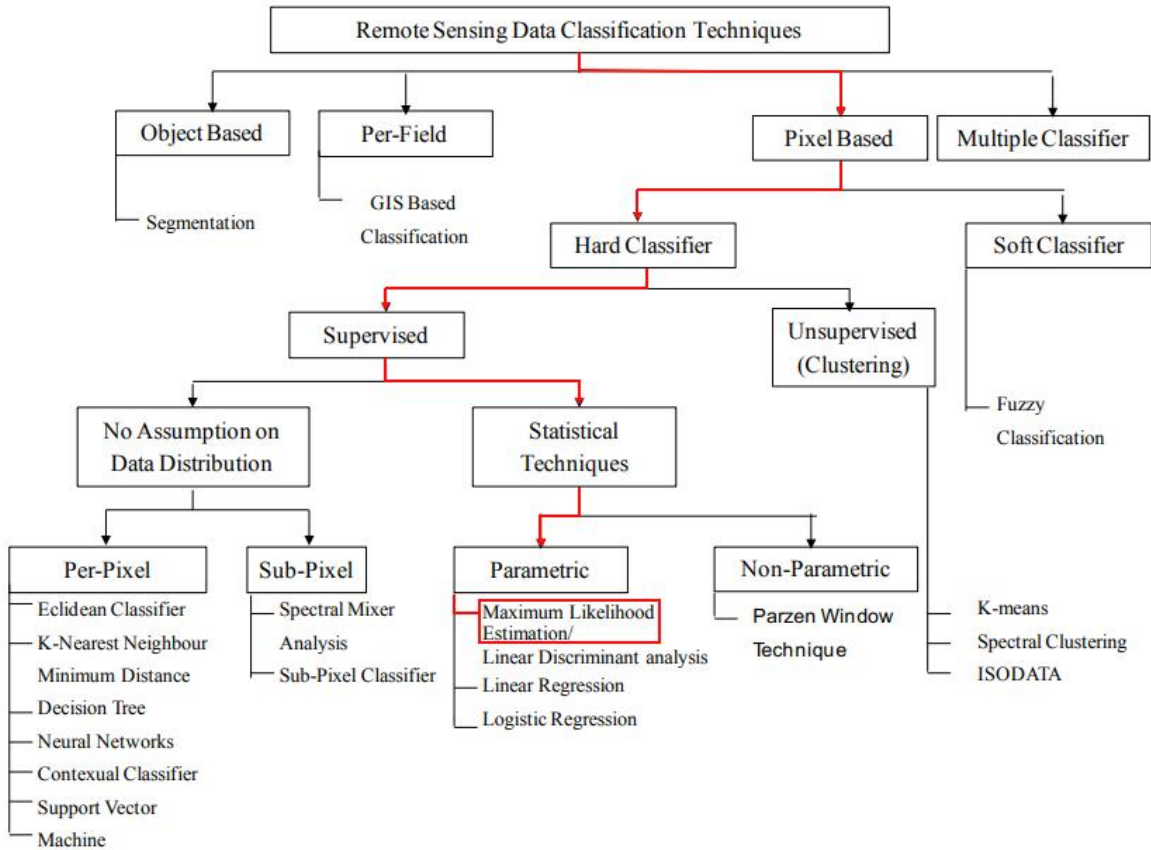


Figura An.1.1: Técnica de clasificación usada para generar el mapa de coberturas del suelo. Fuente: [43]