

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					   	
	CARTA DE AUTORIZACIÓN						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 2

Neiva, 13 de mayo de 2021

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

PAULA ANDREA GOMEZ SARAY, con C.C. No. 1075285938,
 _____, con C.C. No. _____,
 _____, con C.C. No. _____,
 _____, con C.C. No. _____,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado o _____

Titulado VULNERABILIDAD DE SUELOS A LOS PROCESOS DE SODIFICACIÓN EN EL
DISTRITO DE RIEGO RUT, VALLE DEL CAUCA

presentado y aprobado en el año 2021 como requisito para optar al título de

INGENIERO AGRÍCOLA;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS**



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

PAULA ANDREA GOMEZ SARAY

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: _____

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: _____

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: _____

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: _____

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA				   	
	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					
DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA 1 de 4

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: VULNERABILIDAD DE SUELOS A LOS PROCESOS DE SODIFICACIÓN EN EL DISTRITO DE RIEGO RUT, VALLE DEL CAUCA

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
GOMEZ SARAY	PAULA ANDREA

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
TORRENTE TRUJILLO	ARMANDO
ECHEVERRI SANCHEZ	ANDRES FERNANDO

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERO AGRÍCOLA

FACULTAD: INGENIERÍA

PROGRAMA O POSGRADO: INGENIERÍA AGRÍCOLA

CIUDAD: **AÑO DE PRESENTACIÓN:** **NÚMERO DE PÁGINAS:**

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una **X**):

Diagramas___ Fotografías___ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general ☒ Grabados___
 Láminas___ Litografías___ Mapas ☒ Música impresa___ Planos___ Retratos___ Sin ilustraciones___ Tablas
 o Cuadros ☒

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento:

MATERIAL ANEXO:

PREMIO O DISTINCIÓN (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. <u>Sodio</u>	<u>Sodium</u>	6. _____	_____
2. <u>Sodicidad de suelos</u>	<u>Soil Sodicity</u>	7. _____	_____
3. <u>Rendimiento</u>	<u>Performance</u>	8. _____	_____
4. <u>Permeabilidad</u>	<u>Permeability</u>	9. _____	_____
5. <u>Análisis comparativo</u>	<u>Comparative analysis</u>	10. _____	_____

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Los suelos sódicos se caracterizan por contener una alta cantidad de Sodio intercambiable y bajo nivel de sales solubles. El exceso de Sodio intercambiable tiene efecto adverso sobre el crecimiento de plantas y estructura del suelo. Su resultado se traduce en reducción en los rendimientos de cultivos. El objetivo principal de este proyecto es el desarrollo de un modelo de Análisis Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica para la identificación de las zonas con mayor vulnerabilidad frente a la sodificación, con base a los diferentes parámetros de evaluación en el área de estudio Distrito de Riego RUT (Valle del Cauca). La metodología consistió en la determinación de los parámetros propenso a la vulnerabilidad del suelo frente a la sodicidad, un estudio referenciado a expertos con autoridad y experiencia en el tema a tratar, para la aceptación y prioridad de los parámetros expuestos y así mismo un grado de importancia en participación frente a esta problemática, para la generación de las variables del modelo paramétrico y generar mapas por cada factor que interviene en la vulnerabilidad, con el fin de un mapa incluyendo todos los factores involucrados.



ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

Sodium soils are characterized by containing a high amount of exchangeable Sodium and a low level of soluble salts. Excess exchangeable sodium has an adverse effect on plant growth and soil structure. Its result translates into a reduction in crop yields. The main objective of this project is the development of a model of Multicriteria Analysis and Geographic Information Systems to identify the areas with the greatest vulnerability to sodification, based on the different evaluation parameters in the Irrigation District study area. RUT (Valle del Cauca). The methodology consisted of determining the parameters prone to soil vulnerability to sodicity, a study referenced by experts with authority and experience in the subject to be treated, for the acceptance and priority of the exposed parameters and also a degree of importance of participation in the face of this problem, for the generation of the variables of the parametric model and generating maps for each factor that intervenes in vulnerability, in order to create a map including all the factors involved.



UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS

DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO



CÓDIGO

AP-BIB-FO-07

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

4 de 4

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado:

Firma:

Nombre Jurado: JONATHAN ROMERO CUELLAR

Firma:


JONATHAN ROMERO CUELLAR
C.C. 1.075.275.964 de Bogotá, D.C.

Nombre Jurado: JOHN JAIRO AREVALO HERNANDEZ

Firma:



Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.

VULNERABILIDAD DE SUELOS A LOS PROCESOS DE SODIFICACIÓN EN EL
DISTRITO DE RIEGO RUT, VALLE DEL CAUCA

PAULA ANDREA GOMEZ SARAY

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

NEIVA

2021

VULNERABILIDAD DE SUELOS A LOS PROCESOS DE SODIFICACIÓN EN EL
DISTRITO DE RIEGO RUT, VALLE DEL CAUCA

Autor

PAULA ANDREA GOMEZ SARAY COD. 2013223107

Trabajo de grado presentado a la Universidad Surcolombiana Como requisito para optar al
título de: Ingeniero Agrícola

Directores

ARMANDO TORRENTE TRUJILLO

ANDRES FERNANDO ECHEVERRI SANCHEZ

Línea de Investigación: DEGRADACIÓN DE SUELOS

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA AGRÍCOLA

NEIVA

2021

Nota de aceptación

Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Surcolombiana optar al título de **Ingeniera agrícola**

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Dedicatoria

El presente proyecto de grado lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darme la fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados. A mi madre, por su amor, trabajo, apoyo y sacrificio en todos estos años, gracias a ti; he logrado llegar hasta donde estoy y convertirme en lo que soy, hermanos, abuelos y demás familia, a mis docentes de la Universidad Surcolombiana, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de mi profesión.

De manera muy especial, quiero agradecerles a los Doctores Andrés Fernando Echeverri Sánchez y Armando Torrente Trujillo, mis directores del proyecto, quienes me han guiado con su paciencia, apoyo motivacional y su rectitud como docentes.

AGRADECIMIENTOS

Resulta importante reconocer el apoyo de la Universidad del Valle, en la disponibilidad y disposición de la información cartográfica para el estudio, análisis, desarrollo y resultados del proyecto de grado; así mismo agradezco a la Asociación de Usuarios del Distrito de Adecuación de Tierras de los Municipios de Roldanillo, La Unión, Toro (ASORUT), por proveer los recursos y herramientas necesarias para los estudios de suelos, datos climatológicos de los años 2015-2019 y resolución cartográfica para la zona de estudio donde se desarrolla el actual proyecto, ya que no se realizó muestreo o toma de datos. Todo el desarrollo del trabajo estuvo basado en información secundaria. Agradezco a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, quien dispuso toda la información cartográfica, la cual estuvo disponible en el VISOR AVANZADO GEOCVC (https://www.geo.cvc.gov.co/visor_avanzado/).

Quiero extender mis más sinceros agradecimientos al Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC ya que proporcionó los estudios bibliográficos sobre el levantamiento de suelos y zonificación de tierras del departamento del Valle del Cauca, fundamentales para el estudio de mineralización de arcillas, disposición de suelos y aprovechamiento de este, dentro de la zona de estudio, en el actual proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	13
	Fase 1. Consulta de expertos. Según los parámetros identificados en la revisión bibliográfica, se valida con el panel de expertos conformados.	15
	Fase 2. Asignación Pesos o Grados de importancia a parámetros de vulnerabilidad. Se asignaron los pesos a los parámetros seleccionados y consultados por los expertos.	15
	Fase 3. Categorización y normalización de parámetros de vulnerabilidad. Cada factor de vulnerabilidad será dividido en categorías o rangos de acuerdo con su relación con la misma a los procesos de sodicidad de suelos.	15
	Fase 4. Generación de mapas de parámetros de vulnerabilidad. Se generaron los mapas de cada uno de los factores identificados de vulnerabilidad.	15
	Fase 5. Generación de mapa del Índice de Vulnerabilidad de Suelos a la sodicidad (IVSSod). Se calcula el IVSSod por medio de una herramienta del software ArcGIS.	15
2.	MARCO TEÓRICO	16
2.1.	ANÁLISIS MULTICRITERIO.....	16
2.1.1.	Definición	16
2.1.2.	Técnicas de decisión multicriterio	17
2.1.3.	Proceso de análisis jerárquico (AHP).....	18
2.1.4.	Comparaciones pareadas.....	19
2.1.5.	Procedimiento.....	20
2.1.6.	Consistencia	21
2.1.7.	Análisis de sensibilidad.....	22
2.1.8.	Análisis Espacial Multicriterio.....	22
2.2.	DEGRADACIÓN DE SUELOS.....	23
2.2.1.	Definición	23
2.2.2.	Tipos de degradación de suelos.....	24

2.2.3.	Cifras en el mundo	25
2.2.4.	Cifras en Latinoamérica	27
2.2.5.	Cifras en Colombia	29
2.3.	SODICIDAD DE SUELOS	31
2.3.1.	Definición	31
2.3.2.	Indicadores y valores de referencia	32
2.3.3.	Impactos en el suelo	34
2.3.4.	Parámetros asociados a la Vulnerabilidad	35
2.4.	CONCEPTO DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO	45
2.4.1.	Amenaza o peligro	45
2.4.2.	Vulnerabilidad	45
2.4.3.	Riesgo	46
2.4.4.	Gestión del riesgo	47
2.4.5.	Fases de la gestión del riesgo	47
3.	ESTADO DEL ARTE	52
4.	OBJETIVOS	59
4.1.	OBJETIVO GENERAL	59
4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	59
5.	METODOLOGÍA	60
5.1.	ENFOQUE GENERAL DEL ESTUDIO	60
5.2.	IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE VULNERABILIDAD	60
5.3.	CATEGORIZACIÓN Y NORMALIZACIÓN	60
5.4.	ASIGNACIÓN DE PESOS O GRADOS IMPORTANCIA	61
5.5.	GENERACIÓN DE INDICE DE VULNERABILIDAD DE LOS SUELOS A LA SODICIDAD	63
5.6.	DEFINICIÓN DE ZONAS HOMOGÉNEAS	64
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	65

6.1.	PARAMETROS IDENTIFICADOS.....	65
6.2.	CATEGORIZACIÓN Y NORMALIZACIÓN.....	65
6.3.	PESOS DE PARÁMETROS DE VULNERABILIDAD.....	66
6.4.	INDICE DE VULNERABILIDAD DE SODICIDAD DE SUELOS.....	68
6.5.	MAPAS DE PARÁMETROS DE VULNERABILIDAD	68
5.5.1	Mapa de método de riego.	69
5.5.2	Mineralogía de arcillas.	70
5.5.3	Mapa de Conductividad Eléctrica (CE)	71
5.5.4	Mapa de Prácticas de Fertilización.	72
5.5.5	Mapa de pH.	73
5.5.6	Mapa de contenido de Materia Orgánica.	74
5.5.7	Mapa de Capacidad de Intercambio Catiónico.	75
6.6.	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL IVSSod.....	76
6.7.	ZONAS HOMOGÉNEAS.....	77
5.7.1	Análisis espacial.....	79
7.	CONCLUSIONES	82
8.	RECOMENDACIONES	84
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Escala fundamental para comparaciones a pares	19
Tabla 2. Extensión de tierras degradadas en el mundo por diferentes causas.	26
Tabla 3. Porcentaje de degradación de los suelos en América Latina (Región Andina y Centro América)	28
Tabla 4. Capacidad de intercambio de cationes	33
Tabla 5. Clasificación de suelos según su PSI.	34
Tabla 6. Métodos de riego usados en el distrito de riego RUT	43
Tabla 7. Evaluación de la amenaza salinización / sodificación en los suelos del mundo..	53
Tabla 8. Escala de valores para comparación pareada de los parámetros identificados.....	61
Tabla 9. Participantes del panel de expertos	62
Tabla 10. Categorías y valores normalizados de los parámetros identificados.....	65
Tabla 11. Peso por parámetro, evaluado individualmente por cada experto.	67
Tabla 12. Resultados de pesos grupales finales seleccionados por el panel de expertos.....	67
Tabla 13. Relación de parámetros con zonas de alta vulnerabilidad.....	79

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Modelo para la toma de desiciones.....	17
Figura 2. Mapa de criterio de método de riego. Fuente: Autoría del proyecto.	69
Figura 3. Mapa de criterio de mineralogía de arcillas. Fuente: Autoría del proyecto.....	70
Figura 4. Mapa de criterio de Conductividad Eléctrica. Fuente: Autoría del proyecto.....	71
Figura 5. Mapa de criterio de Prácticas de Fertilización. Fuente: Autoría del proyecto.	72
Figura 6. Mapa de criterio de pH. Fuente: Autoría del proyecto.....	73
Figura 7. Mapa de criterio de contenido de Materia Orgánica. Fuente: Autoría del proyecto.	74
Figura 8. Mapa de criterio de Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC). Fuente: Autoría del proyecto.	75
Figura 9. Mapa del Índice de vulnerabilidad de los suelos a la sodicidad (IVSSod) sin categorizar.	77
Figura 10. Mapa del Nivel de vulnerabilidad de los suelos a la sodicidad respecto al (IVSSod) en zonas homogéneas.....	78

RESUMEN

Los suelos al contener una alta concentración de sodio repercutan un efecto adverso sobre el crecimiento de las plantas, una reducción en la permeabilidad y cambios en la estructura del suelo. Todo lo anterior se ve reflejado en una reducción del rendimiento en los cultivos.

En Colombia, el sector agrícola es uno de los más productivos y competitivos del país. Todo esto, se debe a los avances que se han realizado en el campo científico y tecnológico, el fortalecimiento en infraestructura básica y a la facilidad de acceso a recursos productivos y financieros que se tiene en la actualidad.

El siguiente trabajo utilizó herramientas tecnológicas tales como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la Evaluación Multicriterio (EMC), en el cual se llevó a cabo un estudio de la sodicidad del suelo de una importante zona del país (Distrito RUT en el Valle del Cauca), teniendo como base la información recopilada por expertos con dominio del tema y un análisis comparativo con registros bibliográficos para asignar valores de relevancia para cada uno de los parámetros que influyen en la concentración de Sodio en los suelos. Adicionalmente se tuvieron en cuenta los datos suministrados por ASORUT (Asociación de Usuarios del Distrito de Adecuación de Tierras de los Municipios de Roldanillo, La Unión, Toro) comprendidos entre los años 2015 y 2019.

Los parámetros identificados se dividieron en tres grupos de incidencia sobre la vulnerabilidad del suelo frente a la sodicidad, en el primer grupo de mayor importancia se encuentran factores como los métodos de riego, mineralogía de arcillas y la concentración de sales en la fase soluble del suelo. En un segundo grupo de importancia se encuentran las prácticas de fertilización y el pH. Dentro de los parámetros de menor importancia fueron: contenido de materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico. En la zona de estudio se hallaron tres tipos de vulnerabilidad baja, media y alta, excluyendo muy baja y muy alta. La zona de alta vulnerabilidad se ubico en tres puntos principales, el punto norte (zona 1), punto centro (zona 2) y punto sur (zona 3), por cada uno de estos puntos se

identificaron los parámetros que inciden en gran magnitud sobre cada zona de alta vulnerabilidad.

El índice de vulnerabilidad dio como resultado, que el 78.1% (8610 ha) del área total del Distrito RUT presentan como vulnerabilidad media y un 18.8% (2076.7 ha) del área total del Distrito RUT presenta vulnerabilidad alta, resultante de parámetros con mayor influencia en la vulnerabilidad del suelo, tales como: prácticas de riesgo, mineralogía de arcillas y concentración de sales en fase soluble. Solo el 3% (334.9 ha) logran tener una vulnerabilidad baja, de la totalidad de la zona de estudio. Estos valores indican que aproximadamente el 96.9% del suelo cultivable del Distrito RUT tiene tendencia a procesos de sodificación.

Palabras claves: Sodio, Sodicidad de suelos, rendimiento, permeabilidad, análisis comparativo.

1. INTRODUCCIÓN

Se estima que la población mundial pasará de las 6300 x 106 personas de la actualidad a 8500 x 106 en 2025 (Rhoades, 1997) lo que demandará un aumento en la producción de alimentos y fibras del 40-50%. Se prevé que, en las próximas décadas, el incremento de las 2/3 partes de la superficie arable se producirá incorporando áreas desérticas mediante la irrigación. Las tierras irrigadas, representan aproximadamente el 15% de las tierras cultivables en la actualidad y producen el 36% de los productos alimenticios mundiales (FAO 2006). No obstante, el enorme esfuerzo tecnológico que se ha desarrollado últimamente para el riego y la experiencia acumulada, quedan aún enormes brechas tecnológicas para desarrollar. El peligro que aparece sobre toda área regada es la salinización y sodificación del suelo, así como del acuífero subterráneo. (Chambouleyron, 1980).

Los suelos salinos-sódicos están ampliamente distribuidos en todo el planeta. Estadísticas a nivel mundial reflejan que los suelos salinos y sódicos cubren una superficie de 8.369.000 km² (FAO, 2011) es decir el equivalente a siete veces la superficie de Colombia. Flowers (2004) considera una superficie aproximada de 900 x106 ha y argumenta que, si bien la superficie de suelo afectada por sales a nivel mundial es imprecisamente conocida, esta extensión es suficiente para representar una amenaza para la agricultura.

Nuestro país Colombia, aproximadamente un 15% del territorio presenta algún nivel de salinización y sodicidad en suelos; siendo las zonas más afectadas en la región Caribe en los valles interandinos de los ríos Magdalena y Cauca (IDEAM, 2017); En Latinoamérica se encuentran países como Argentina siendo el tercer país con mayor superficie de suelos salinos alcalinos del mundo (Lavado y Taboada, 2009) ocupando una superficie de 516.000 km² (FAO, 2011); esto representa un 14 % de la superficie de Argentina. Entre otros países que presentan también graves problemas de este tipo, entre ellos se destacan por su superficie Australia, con 1.580.000 km² de suelos afectados por problemas de salinidad y/o sodicidad y China, donde la superficie con estas limitantes alcanza los 750.000 km². Aunque actualmente apenas el 17% del total de la superficie

agrícola mundial cuenta con irrigación, en esas tierras se produce el 40 por ciento de los alimentos del mundo y la salinización está reduciendo la superficie irrigada del mundo entre 1 y 2 % por año, con mayor intensidad en las regiones áridas y semiáridas (25%) (FAO, 2002)

La salinidad y la sodicidad son de los problemas más comunes que se encuentran en los suelos agrícolas del Valle del Cauca, que ocasionan un detrimento de sus propiedades físicas, químicas y biológicas. (Méndez, 2015). Según la (CVC, 2004), De las tierras dedicadas a la agricultura en el departamento del Valle, 299.226 hectáreas del valle geográfico del río Cauca presentan degradación asociada al mal manejo del agua en la actividad agrícola; alrededor del 30% (85,000 ha) están afectada por alto contenido de sales especialmente de sodio y mal drenaje, ubicándose principalmente en la zona norte del departamento. Dicho contenido de sales sigue aumentando debido al manejo inadecuado que se le da al agua en la agricultura y a la reutilización de aguas superficiales salinizadas.

Cuando el principal componente de un suelo salino es el ion sodio, este es considerado como sódico. En estos suelos, el alto contenido de sodio intercambiable genera problemas importantes de porosidad y permeabilidad originados por la dispersión de los coloides, aparte de que este elemento también puede producir toxicidad en plantas susceptibles. (Jaramillo, 2002).

Con relación a sus propiedades nutricionales, estos suelos presentan las mismas limitaciones que los salinos, aunque en un grado mayor que aquellos, debido a que los sódicos presentan mayores valores de pH; García (1997) encontró que en la mayoría de los suelos sódicos del Valle del Cauca el anión predominante es el sulfato.

Se realizará una metodología tipo mixta; ya que es cuantitativa y cualitativa buscando ser objetiva en la recolección de datos cuantitativos, incluyendo la medición sistemática, y empleo del análisis estadístico. Tipo de estudio explicativo; donde busca la razón lógica de los hechos, estableciendo relación entre causa- efecto, por medio de un método correlacional.

El enfoque general del trabajo es la gestión del riesgo, específicamente el elemento de vulnerabilidad, entendido como la susceptibilidad del elemento expuesto (suelo) a una

amenaza determinada (en este caso, los procesos de sodicidad). Otra premisa del trabajo es la espacialización de la información, lo cual se logrará con el uso de los sistemas de información geográfica.

La metodología desarrollada en el proyecto se enfoca en seis fases, las cuales se describirán a continuación.

Fase 1. Consulta de expertos. Según los parámetros identificados en la revisión bibliográfica, se valida con el panel de expertos conformados.

Fase 2. Asignación Pesos o Grados de importancia a parámetros de vulnerabilidad. Se asignaron los pesos a los parámetros seleccionados y consultados por los expertos.

Fase 3. Categorización y normalización de parámetros de vulnerabilidad. Cada factor de vulnerabilidad será dividido en categorías o rangos de acuerdo con su relación con la misma a los procesos de sodicidad de suelos.

Fase 4. Generación de mapas de parámetros de vulnerabilidad. Se generaron los mapas de cada uno de los factores identificados de vulnerabilidad.

Fase 5. Generación de mapa del Índice de Vulnerabilidad de Suelos a la sodicidad (IVSSod). Se calcula el IVSSod por medio de una herramienta del software ArcGIS.

El presente proyecto busca identificar los niveles de vulnerabilidad del suelo a los procesos de sodicidad, por medio de un modelo de Análisis Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica en el Distrito de Riego RUT (Valle del Cauca).

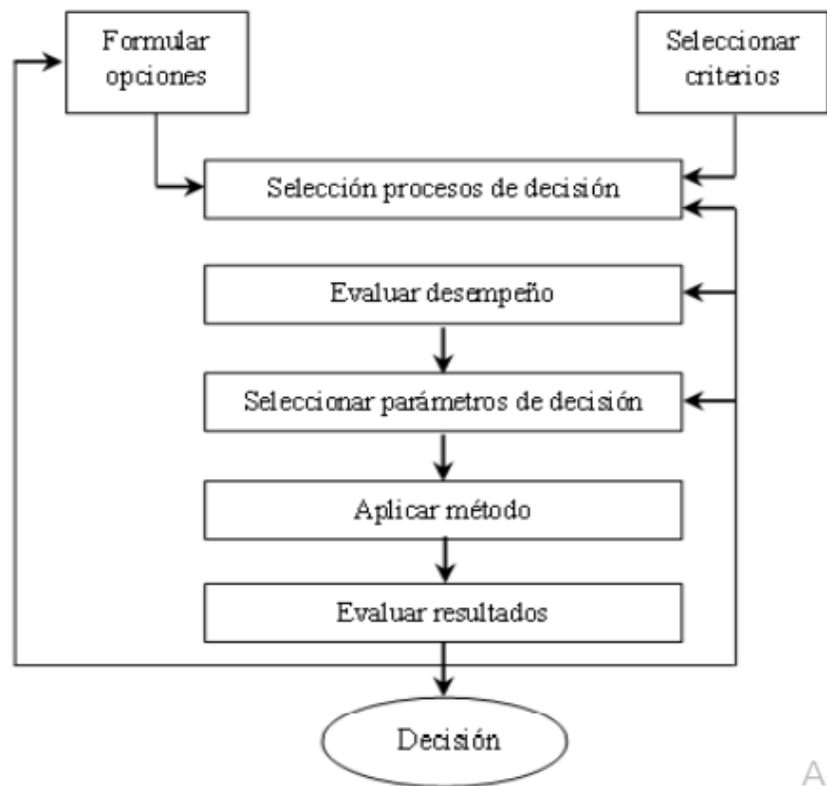
2. MARCO TEÓRICO

2.1. ANALISIS MULTICRITERIO

2.1.1. Definición

El análisis multicriterio es una herramienta de apoyo en la toma de decisiones durante el proceso de planificación que permite integrar diferentes criterios de acuerdo a la opinión de actores en un solo marco de análisis para dar una visión integral.

La opinión autocrática en la toma de decisión puede tornarse insuficiente cuando se analizan problemas complejos, sobre todo aquellos problemas en donde la solución puede afectar a muchas otras personas (Munda, 2004; Mendoza & Martins, 2006; Dou, Zhu & Simon, 2012). Debido a lo anterior, se debe propender por generar discusiones e intercambio de ideas y opiniones entre expertos (figura 1), quienes por su experiencia y conocimiento pueden ayudar a estructurar el problema y a evaluar las posibles soluciones (Hernández, Fernández & Baptista, 2006; Dalalah, Hayajneh & Batieha, 2011).



Ac

Figura 1. Modelo para la toma de decisiones.
Fuente: Grajales-Quintero, A., Serrano-Moya, E. D., & HAHN VON-H, C. M. (2013).

El proceso de decisión requiere de la comparación entre las alternativas sobre las que se puede optar frente a cierta disyuntiva presente (Wen-Hsiang, Chang-tzu & Chin-tsai, 2008).

En primer lugar se hace necesario separar un problema de decisión en los “elementos” que lo componen para la posterior comparación entre ellos, de esta manera la toma de decisión implica realizar mediciones que permitan aplicar los criterios de comparación para establecer preferencias entre ellos (jerarquías) (Font, 2000). Si se desea tener una herramienta eficaz y eficiente que apoye las decisiones, es de importancia contar con la mayor cantidad de elementos de análisis junto al proceso más adecuado para ello (Arancibia et al., 2005; Montibeller & Franco, 2010).

En Colombia es necesario identificar y analizar las causas de los problemas que se presentan en el sector agrícola con el fin de evaluar posibles soluciones, todo con el fin de elaborar políticas efectivas en el sector (Stirling, 2006). En este sentido el método multicriterio no considera soluciones óptimas, pero permite desde su estructura analítica en función de las preferencias de los agentes seleccionar la(s) mejor(e)s alternativa(s) de solución de problemas (Toskano, & Bruno, 2005).

2.1.2. Técnicas de decisión multicriterio

Destacan las tres aproximaciones más extendidas en el campo de la Decisión Multicriterio Discreta: La Teoría de Utilidad Multiatributo (“MAUT”) basada en los trabajos de Keeney y Raiffa (1976); El proceso Analítico Jerárquico (AHP) basado en los trabajos de Thomas L. Saaty, y las técnicas de superación “outrankings”, basadas en los trabajos de Bernard Roy (1969, 1985).

Se entiende por Técnicas de Decisión Multicriterio el conjunto de herramientas y procedimientos utilizados en la resolución de problemas de decisión, en los que intervienen diferentes criterios, generalmente en conflicto (Arancibia, Contreras, Mella, Torres, & Villablanca, 2003).

2.1.3. Proceso de análisis jerárquico (AHP)

El proceso analítico jerárquico (AHP), es una metodología de análisis multicriterio desarrollada a fines de la década del 70 por el doctor en matemáticas Thomas L. Saaty. Con el tiempo se transformó en una de las metodologías multicriterio de mayor aplicación práctica, ese es el motivo por el cual se seleccionó para la aplicación objeto de este trabajo. (Arancibia, Et al 2003).

El Proceso de Análisis Jerárquico, está diseñado para resolver problemas complejos de criterios múltiples. El proceso requiere que quien toma las decisiones proporcione evaluaciones subjetivas respecto a la importancia relativa de cada uno de los criterios y que, después, especifique su preferencia con respecto a cada una de las alternativas de decisión y para cada criterio. El resultado del AHP es una jerarquización con prioridades que muestran la preferencia global para cada una de las alternativas de decisión (Toskano, Et al; 2005).

En un ambiente de certidumbre, el AHP proporciona la posibilidad de incluir datos cuantitativos relativos a las alternativas de decisión. La ventaja del AHP consiste en que adicionalmente permite incorporar aspectos cualitativos que suelen quedarse fuera del análisis debido a su complejidad para ser medidos, pero que pueden ser relevantes en algunos casos. El AHP, mediante la construcción de un modelo jerárquico, permite de una manera eficiente y gráfica organizar la información respecto de un problema, descomponerla y analizarla por partes, visualizar los efectos de cambios en los niveles y sintetizar.

El AHP “se trata de desmenuzar un problema y luego unir todas las soluciones de los subproblemas en una conclusión” (Saaty, 1980).

El AHP involucra todos los aspectos del proceso de toma de decisiones: Modela el problema a través de una estructura jerárquica, utiliza una escala de prioridades basada en la preferencia de un elemento sobre otro, de este modo combina la multiplicidad de escalas correspondientes a los diferentes criterios, sintetiza los juicios emitidos y entrega un

ranking u ordenamiento de las alternativas de acuerdo a los pesos obtenidos (prioridades), (Arancibia, Et al 2003).

2.1.4. Comparaciones pareadas

Las comparaciones pareadas son bases fundamentales del AHP. El AHP utiliza una escala subyacente con valores de 1 a 9 para calificar las preferencias relativas de los dos elementos. Se presentan las calificaciones numéricas que se recomiendan para las preferencias verbales expresadas por el decisor. Investigaciones anteriores han determinado que está es una escala razonable para distinguir las preferencias entre dos alternativas (Toskano, Et al; 2005).

Tabla 1. Escala fundamental para comparaciones a pares

Planteamiento verbal de la preferencia	Calificación Numérica
Extremadamente preferible	9
Entre muy fuertemente y extremadamente preferible	8
Muy fuertemente preferible	7
Entre fuertemente y muy fuertemente preferible	6
Fuertemente preferible	5
Entre moderadamente y fuertemente preferible	4
Moderadamente preferible	3
Entre igualmente y moderadamente preferible	2
Igualmente preferible	1

Fuente: “toma de decisiones para lideres” (Thomas Saaty, 1997).

En la tabla 1 se definen y explican los elementos que forman la escala recomendada para las comparaciones a pares entre los elementos de los niveles de la jerarquía, los valores en ella contenidos representan una escala absoluta, con los que se puede operar perfectamente. En todo caso cabe señalar que el método es independiente de la escala utilizada.

2.1.5. Procedimiento

Según Arancibia, Et al (2003), para determinar la mejor decisión el método AHP requiere:

1. **Definición del problema:** En esta etapa debe quedar claramente definido el objetivo general del proceso de decisión junto con los actores involucrados en él.
2. **Definición de actores:** Los participantes involucrados en el proceso de decisión, deben ser cuidadosamente seleccionados, ya que de estos depende la representatividad del resultado del modelo. Deben quedar resueltas preguntas como: quiénes, cuántos, nivel de educación requerido, a quién representan, por qué deben formar parte del proceso, ya sea por su conocimiento de la situación problema o, porque representan a un grupo de interés, entre otros.
3. **Estructurar el problema de decisión en un modelo de jerarquía (Jerarquizar):** En esta etapa se debe construir una estructura jerárquica que involucre todos los aspectos de interés, para la jerarquización de las alternativas.
4. **Selección de las alternativas factibles:** Dentro de todas las posibilidades de proyectos alternativos se seleccionan aquellos que son factibles de realizar bajo un punto de vista de análisis general, donde se consideran criterios tales como la factibilidad técnica o económica.
5. **Construcción del modelo jerárquico:** Se estructura el problema planteado en una jerarquía de criterios y alternativas. Para esto es necesario definir en una primera instancia los criterios estratégicos que participan en la decisión (Políticos, económicos, sociales, medioambientales, etc.). Por lo general estos criterios son a nivel macro y representan los objetivos perseguidos por el proyecto. Una vez hecho esto, se procede a desglosar cada uno de los criterios definidos en la etapa anterior hasta llegar a un nivel de especificación que permita un fácil análisis y la comparación de las alternativas.
6. **Ingreso de los juicios:** En base a la información obtenida o a la percepción de los actores del proceso se ingresan los juicios para cada par de elementos. Se comienza del primer nivel, dónde se encuentran los criterios estratégicos, se compara su importancia relativa con respecto del logro del objetivo general, luego se desciende en los niveles jerárquicos, siempre realizando comparaciones de a pares referidos al nivel inmediatamente superior, hasta llegar al último nivel donde se encuentran las alternativas, las que son evaluadas en base a criterios técnicos más fáciles de tratar.

7. **Síntesis de los resultados:** por medio de comparaciones entre pares de elementos con respecto a su nivel inmediatamente superior y, gracias a la propiedad de transitividad entre los elementos, es posible establecer un ranking de prioridades para las diferentes alternativas, ranking que, dependiendo de la problemática, enfrentada representa la decisión a adoptar.
8. **Validación de la decisión:** Para otorgar mayor confiabilidad a la decisión se debe establecer el rango de variación del peso relativo de los criterios estratégicos que soporta la decisión sin cambiar de alternativa propuesta, para esto se realiza un análisis de sensibilidad dónde se analizan diversos escenarios posibles, determinando los puntos de corte para el peso de cada uno de los criterios.

Cabe destacar que todo este proceso debe estar muy bien documentado, cada una de las etapas debe contar con la información suficiente para su desarrollo y justificación.

2.1.6. Consistencia

Una consideración importante en términos de la calidad de la decisión final se refiere a la consistencia de los juicios que muestra el tomador de decisiones en el transcurso de la serie de comparaciones pareadas. El AHP ofrece un método para medir el grado de consistencia entre las opiniones pareadas que proporciona el decisor. Si el grado de consistencia es aceptable, puede continuarse con el proceso de decisión. Si el grado de consistencia es inaceptable, quien toma las decisiones debe reconsiderar y posiblemente modificar sus juicios sobre las comparaciones pareadas antes de continuar con el análisis. (Toskano, Et al; 2005).

Se calcula la razón de consistencia (RC) (o CR, de Consistency Ratio). Esta razón o cociente está diseñado de manera que los valores que exceden de 0.10 son señal de juicios inconsistentes; es probable que en estos casos el tomador de decisiones desee reconsiderar y modificar los valores originales de la matriz de comparaciones pareadas. Se considera que los valores de la razón de consistencia de 0.10 o menos son señal de un nivel razonable de consistencia en las comparaciones pareadas (Toskano, Et al; 2005).

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

$RC \leq 0.10$: Consistencia Razonable

$RC > 0.10$: Inconsistencia

2.1.7. Análisis de sensibilidad

Este análisis permite visualizar y analizar la sensibilidad del resultado (ordenación de las alternativas) respecto de posibles cambios en la importancia de los criterios (supuestos). El análisis de sensibilidad debe responder a la pregunta: ¿Qué pasa si...?; Facilitando el análisis en aquellos procesos de toma de decisión en los que se requiere volver a aplicar el AHP en un corto o mediano plazo porque son procesos dinámicos que requieren ser revisados y ajustados en el tiempo porque su entorno está en continuo cambio (Toskano, Et al; 2005).

2.1.8. Análisis Espacial Multicriterio

El Análisis Espacial Multicriterio (AEM), es una herramienta de gran ayuda para la toma de decisiones espaciales orientadas a la planificación del territorio, permitiendo facilitar la localización de los usos del suelo, destinando zonas que presenten una mayor aptitud y menor impacto posible, es decir, áreas óptimas (Rueda, 2020).

El análisis espacial multicriterio (AEM) ofrece la posibilidad de definir los estándares metodológicos para el mapeo de servicios ecosistémicos, debido a que dicha técnica es flexible en su forma, permite rescatar la opinión de expertos y actores sociales, la cual es espacializada a través de una plataforma SIG (Malczewski 2006). En este punto, los Sistemas de información Geográfica SIG han demostrado a nivel mundial su eficiencia e importante utilidad en el ámbito de la planificación (Bosque Sendra, 1997; Longley et al., 2005; Buzai y Bandexale, 2006).

La evaluación multicriterio incorpora la opinión o percepción de los actores en las variables y criterios que componen el modelo de evaluación. Los criterios son seleccionados, cuidadosamente, por expertos (evitando la presencia de sesgos), para luego ser ponderados y valorados por los actores locales, mientras que los SIG permiten integrar las variables y sus criterios con atributos geoespaciales (Feick 2010). De esta forma, con la

aplicación del AEM es posible recoger las distintas percepciones de actores respecto a la localización de servicios ecosistémicos, mediante una metodología racional y espacialmente explícita (Fontana et al. 2013).

2.2. DEGRADACIÓN DE SUELOS

2.2.1. Definición

Desde la perspectiva de los autores Espinosa, Andrade, Rivera y Romero (2011), citando a Oldeman (1998), se entiende la degradación de los suelos como un proceso netamente promovido por el ser humano, el cual lleva a disminuir la capacidad, presente y futura, para sostener la vida humana. Dicho proceso se relaciona con el régimen climático, las condiciones geomorfológicas y las características intrínsecas de los suelos, pero sobre todo con la deforestación, el establecimiento de sistemas agrarios inapropiados y el impacto que causan las políticas públicas en el medio ambiente (Espinosa et al., 2011). Estas problemáticas se dan debido a que este recurso no tiene el mismo reconocimiento que otros recursos naturales como el agua, los bosques o los yacimientos minerales, porque no es un bien directamente consumible, además de que existe la creencia errónea de que los suelos son renovables a escala humana, razones por las cuales generalmente la sociedad no se siente inquieta por la degradación de los suelos, sin embargo el ser humano logra destruirlos en unos pocos años, lo que a la naturaleza le cuesta formar en miles de años (Zinck, 2005).

Otro de los conceptos que se tiene de los suelos, según la USDA (1999) es el de una colección de cuerpos naturales sobre la superficie de la tierra en lugares modificados o aún los hechos por el hombre de materiales que contienen materia viviente y soporta o es capaz de soportar plantas en el exterior. Su límite superior es el aire o las aguas someras. Sus márgenes varían en grados de la profundidad de las aguas o de las áreas desprovistas de vegetación (eriales), de roca o hielo. Su límite inferior con el no suelo probablemente sea el más difícil de definir.

Se puede entender que el suelo es un recurso natural esencial para la vida en el que se presentan transformaciones producto de interacciones de diferentes actividades y procesos físicos, químicos, biológicos y antrópicos. Todos estos se dan de manera simultánea actuando sobre la roca originaria y con el paso del tiempo creando un sustrato

en el cual se encuentran nutrientes, agua, aire y sostén para el desarrollo de plantas terrestres y demás biota que se pueda generar allí y de igual manera se puede reconocer entonces que la sostenibilidad del recurso del suelo depende de entender las características y procesos que sirven a un ecosistema, de las funciones de importancia de los suelos y de los cambios que ocurren a través de las interacciones con el medio ambiente, por lo cual el término de susceptibilidad, en el momento que se aplica al suelo implica la posibilidad de cambios adversos en las propiedades del suelo y en los procesos que conducen a la reducción en la habilidad para desarrollar sus funciones en el ecosistema. El producto de esos cambios adversos es colectivamente llamado degradación de suelos (Espinosa et al., 2011)

Al no existir una interacción humana con el suelo, este se encuentra equilibrado y dinámico con el entorno e interactuando con la biosfera, lo que genera una estabilidad en la actividad biótica, las cuales pueden soportar unas formas de vida específicas, por lo cual el cambio desfavorable en estas propiedades bióticas, conlleva a que se reduzca sus funciones, por lo tanto, la degradación de los suelos lleva a que se den cambios desfavorables en sus propiedades, lo que significa que estos cambios que se pueden generar a partir de la alteración del equilibrio dinámico del suelo con el medio ambiente por las perturbaciones tanto naturales y humanas (Espinosa et al., 2011) sin embargo estos autores aseguran que las perturbaciones naturales pueden readaptarse rápidamente, pero las humanas, que son cambios mucho más rápidos, pueden generar alteraciones mucho más drásticas en las propiedades del suelo.

La consideración del papel que desempeñan los suelos en los ecosistemas, tanto en los naturales como en los agroecosistemas, provee una base para la evaluación del uso de la tierra y la conservación del suelo, para el control de la calidad del agua y otros aspectos generales de la calidad de vida de los seres humanos que dependen del suelo (López, 2002.)

2.2.2. Tipos de degradación de suelos

Lal (2000) considera que existen dos tipos principales de degradación de los suelos, el primero natural por la acción de los factores de formación del suelo, el segundo es la

producida por el hombre, el primero se da de forma lenta, mientras que la segunda se da de forma rápida. De igual manera considera que existen 3 mecanismos de degradación de suelos por la presencia humana (industrial, urbana y agrícola). La industrial es la más grave en los países desarrollados, por otro lado, los procesos de degradación que se dan por la agricultura son divididas en físicas, químicas o biológicas. De igual manera Oldeman y Van Lynden (1998) categorizaron de manera amplia estos fenómenos para la Global Assessment of Status of Human – Induced Soil Degradation (GLASOD), el primero son los procesos que se relacionan con el desplazamiento de material del suelo por el agua o el viento, lo que conlleva a que se pierda el material del suelo o a la deforestación en el lugar, pero de igual manera genera efectos a distancia como la sedimentación, inundaciones, destrucción de ecosistemas marinos y daños a infraestructuras, estos serían las degradaciones por erosión hídrica y eólica.

En segundo lugar, se encuentran los procesos que determinan el deterioro de los suelos en el mismo territorio, estos procesos son de naturaleza química, como el agotamiento de nutrientes, la pérdida de material orgánico, la salinización, acidificación, sodificación y la contaminación; También están los procesos de naturaleza física como el sellado y encostramiento de la superficie del suelo, la compactación y el anegamiento; por último están los procesos de orden biológico, que conducen a un desequilibrio de la actividad biológica en el episuelo (López, 2002).

En este caso en particular se enfocará en la degradación de suelos por Salinidad, más puntualmente sobre la degradación por sodificación. Este caso se da especialmente por la agricultura de riego y puede conducir a una pérdida temporal o total de la capacidad de producción, causada por una degradación interna de sus propiedades químicas o físicas.

2.2.3. Cifras en el mundo

Debido al acelerado crecimiento poblacional del planeta, aumenta también la demanda por alimentos y agua, lo que genera una mayor intervención del hombre sobre los suelos, a través de la expansión e intensificación de actividad agrícola, además del aumento de las áreas pobladas. Ildefonso Pla Sentís (2006) estima que a lo largo de la historia de 1/3 a 1/2 de la superficie de la tierra han sido transformados por las acciones del ser humano, principalmente con la agricultura, pues el 12% de la superficie terrestre se encuentra bajo

cultivo permanente. A esto se le suma los procesos de urbanización, que con el aumento poblacional y de las migraciones del campo a las ciudades, ha generado que áreas agrícolas de 500.000 hectáreas al año, se conviertan en espacios urbanos, esto se nota principalmente en los países desarrollados. Estos procesos, según Pla (2006), han generado que se utilicen suelos menos favorables para la agricultura y más propensos a los daños.

Este mismo autor explica que desde inicios del siglo XXI se ha considerado que hay más de 3600 millones de hectáreas, correspondiente al 25% de las tierras a nivel mundial, que se encuentran afectadas por diferentes grados de degradación, que incluye el 30% de las tierras bajo riego, el 47% de las tierras con agricultura de secano, y el 73% de las tierras de pastoreo. Además, señala que al año se pierde parte de la productividad por la degradación del suelo: entre 1,5 y 2,5 millones de hectáreas de tierras bajo riego; 3,5 y 4,0 millones de ha de tierras agrícolas de secano y 35 millones de ha de tierras para pastoreo.

Cerca de 500 millones de hectáreas, de un total cultivable de 1500 millones de hectáreas se han abandonado en las últimas décadas, especialmente por la erosión hídrica que las volvió improductivas y su recuperación puede llegar a tardar cientos de años, por lo cual llevaría a la buscar nuevos lugares, generalmente áreas pastosas o bosques. A continuación, en la tabla 2 se muestra las extensiones de tierras degradadas a nivel mundial, por diversas causas de degradación.

Tabla 2. Extensión de tierras degradadas en el mundo por diferentes causas.

CAUSA	Hectárea x 10					
	África	Asia	Oceanía	Europa	N. América	S. América
Deforestación	19	116	4	39	4	32
Sobre pastoreo	185	116	79	41	28	26
Agricultura	62	97	5	18	41	12
Sobre Explotación*	54	42	2	2	6	9
Bio-industrial**	0	1	0	1	0	0

Fuente: Recuperado del documento *Problemas de Degradación de Suelos en el Mundo: Causas y Consecuencias*, escrito por Idelfonso Pla Sentís, para el X Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. (2006)

La salinización y la sodificación son los principales procesos de degradación de suelos que afectan las tierras bajo riego. El creciente desarrollo de la agricultura de riego es necesario para la producción sostenible de los alimentos requeridos por la creciente población mundial. Hoy en día las áreas bajo riego en el Mundo alcanzan ya los 320 millones de Ha (el doble de hace 50 años), y en ellas se produce el 40% de los alimentos, aunque sólo representen un 20% del total de tierras cultivadas. Para ello consumen alrededor del 70% del agua de calidad disponible en el mundo (Pla, 2014).

2.2.4. Cifras en Latinoamérica

Para el caso Latinoamericano, en las últimas décadas, se ha generado una degradación de los suelos debido a las políticas de desarrollo y de expansión de la agricultura, lo que ha generado un descenso en la productividad, incrementos en el costo de producción y también un incremento en problemáticas como inundaciones, deslizamientos, sedimentación en los reservorios de agua o la suplencia de esta. Gran parte de las tierras disponibles para la agricultura, especialmente en las zonas tropicales hacen parte de un ecosistema muy frágil, en las cuales coinciden la explotación agrícola de subsistencia, itinerantes y de muy bajos insumo, realizada por agricultores sin tierras en áreas reducidas o los desarrollos agrícolas comerciales en grandes extensiones con alto uso de insumos (Pla, 2006).

La degradación de suelos y tierras en América Latina comenzó hace ya siglos, especialmente después de la colonización por países europeos, las actividades humanas que más han desarrollado o intensificado los procesos de degradación de suelos han sido el sobre pastoreo, la deforestación y los incendios forestales, y más recientemente las nuevas prácticas de manejo asociadas a la intensificación agrícola, a la mecanización, al inadecuado mantenimiento o abandono de estructuras de conservación como terrazas, al mal uso de aguas superficiales o subterráneas para agricultura de riego, etc. Estas nuevas prácticas de uso y manejo de las tierras son consecuencia de cambios en políticas de desarrollo, condiciones socioeconómicas, precios de los productos en el mercado, hábitos de consumo, etc., asociados a progreso tecnológico y a cambios de sistemas de producción.

Aunque la erosión hídrica ha afectado más a las tierras con alta pendiente en zonas montañosas, otros problemas como compactación, sellado y encostrado, salinización y sodificación, etc. Se han generalizado en tierras de zonas más planas con agricultura de secano y de riego. Hay evidencias de que la degradación de suelos y tierras en América Latina están creciendo, debido a diferentes causas y combinaciones de ellas, que varían de una región o país al otro. Cada año, más de cinco millones de hectáreas de tierras son deforestadas en América Latina, 3 millones en zonas tropicales húmedas, 0,5 millones en zonas montañosas, y 2 millones en otros bosques en zonas subhúmedas y subtropicales. Los procesos de erosión afectan en diferentes grados casi un 50% de las tierras cultivadas y casi dos millones de hectáreas de tierras con pastos. Se considera que ya más de 300 millones de hectáreas están afectadas por diferentes tipos y grados de degradación de suelos, entre ellas 100 millones por deforestación y alrededor de 80 millones por sobre pastoreo.

En la tabla 2 se presentan los principales tipos de degradación que se dan en los suelos Latinoamericanos.

Tabla 3. Porcentaje de degradación de los suelos en América Latina (Región Andina y Centro América)

	Porcentaje del área total de tierras		
	América Latina	Región Andina	Centro América
Sin Limitaciones	3	2	6
Pendiente (>30%)	20	33	31
Pendiente (8-30%)	30	41	36
Mal Drenaje	11	14	17
Déficit de Humedad	14	9	1
Baja Fertilidad	11	11	21
Clima Sub-húmedo			
Baja Fertilidad	36	36	60
Clima Húmedo			

Fuente: recuperado del documento Problemas de degradación de suelos en América Latina: Evaluación de causas y efectos, escrito por Idelfonso Pla Sentis de la Universidad de Lleida, en España (2006).

En América Latina el área bajo riego alcanza hoy en día unas 20-25 millones de ha (10-12% del total de área cultivada), en especial en las regiones Andina, Cono Sur y México, con un 25-30% fuertemente afectada por problemas de salinidad y sodicidad, que se incrementa en cerca de medio millón de ha al año (Pla, 1997), fundamentalmente por un deficiente manejo del riego y del drenaje. También están creciendo los problemas en condiciones de secano, por cambios en los niveles y composición de aguas freáticas, derivados de cambios en el uso y manejo de las tierras que afectan su hidrología (Pla, 2002).

2.2.5. Cifras en Colombia

Para el caso colombiano, se encontraron investigaciones realizadas por el IDEAM (2019), divididos por tipos de degradación (Salinización, Erosión y Desertificación) para el caso de la salinización, se incluye al área continental y las zonas insulares de San Andrés y Providencia y Santa Catalina. El estado de la salinización de suelos se realizó para los dos primeros horizontes, hasta una profundidad de 75 cm (IDEAM, 2019). Colombia presenta procesos de salinización de los suelos de tipo natural en un 7,9 % del país; sin embargo, de este porcentaje, una parte está afectada por actividades antrópicas por lo cual se consideran como procesos mixtos de salinización, quedando un porcentaje neto natural de 4,3 % y mixto de 3,6 % de la superficie total. Se estima, a escala nacional que un 3,7 % de los suelos del país presentan procesos de salinización por actividades antrópicas exclusivamente.

Los principales procesos naturales se deben a condiciones climáticas secas y a materiales parentales ricos entre ellos en magnesio, calcio y sodio, como es el caso de las áreas hidrográficas Caribe y Magdalena- Cauca. También se presentan procesos de tipo natural en la zona del Pacífico por influencia marina y materiales parentales ricos en sulfatos. Se estima que el 11,6 % del país presenta algún grado de salinización, este porcentaje está distribuido así: 2,8 % de los suelos del país en grado ligero (3.147.320 ha); 7,4 % con grado moderado (8.421.500 ha); 0,5 % con grado severo (531.124 ha) y 1,0 % con grado muy severo (1.142.051 ha). El 86,4 % no presenta problemas por salinización, porque corresponde al grado muy ligero (98.566.941 ha). El 2 % restante se refiere a zonas sin suelo (cuerpos de aguas, zonas urbanas, etc.). (IDEAM. 2019)

Además, Colombia presenta diversidad de salinización. En algunos casos los suelos tienen solo una clase, pero en la mayoría son mixtos, con más de dos clases al mismo tiempo. Las clases de suelos con estos procesos son magnésicas, 58 % de los suelos; seguida de suelos mixtos con problemas de conductividad eléctrica alta, sodio, calcio y magnesio altos, estos abarcan el 13,1 %. La clase alcalina, con 6,8 %; la calcárea con 5,4 % y la salina con 4,8 %. El grado de salinización muy severo, considerado el más crítico abarca 1.141.096 ha (1,0 %) está distribuido con mayor presencia en los departamentos de Magdalena, La Guajira, Nariño, Valle del Cauca y Cesar. Sus principales condiciones son climáticas y edafogénicas, aceleradas en algunos casos por los usos del suelo. Las áreas calificadas bajo este grado corresponden a las salino-sódico-calcáreo/magnésico, salino-sódico, sódico, sódico-magnésico y calcáreo como las más representativas. Las zonas con grado de salinidad severo corresponden al 0,5 % (531.124 ha). Se encuentran distribuidas con mayor presencia en los departamentos de La Guajira, Valle del Cauca, Cundinamarca, Bolívar y Magdalena, las más representativas corresponden principalmente las clases salino-sódico-magnésico/calcáreo, salino-sódico, sódico-magnésico- sulfatado ácido, sódico-magnésico, sódico y magnésico. El 7,4 % (8.420.752 ha) de los suelos del área continental de Colombia presentan un grado de salinidad moderado, están distribuidos con mayor presencia en los departamentos de Antioquia, La Guajira, Magdalena y Tolima. Se presentan casi todas las clases de salinización, predominan las clases magnésica, calcárea y sódico-magnésica. (IDEAM. 2019)

Las zonas menos críticas, pero con ocurrencia de procesos de salinización, en grado ligero, abarcan el 2,8 % (3.147.200 ha), dentro de estas se encuentran los departamentos de Córdoba, Bolívar, Cesar, Sucre y Santander. La mayor parte corresponde a las clases magnésica, alcalina, sódica y salina. Los grados ligero y moderado se consideran de importancia ya que estos pueden aumentar de grado, especialmente, donde las actividades antrópicas están directa e indirectamente asociadas al aumento de salinización, es decir el 10,2 % de los suelos del país requiere prácticas de manejo sostenibles que impidan su aumento. Mientras que las clases severo y muy severo (1,5 % del país) ya se consideran zonas en las cuales se debe hacer control y rehabilitación para el grado severo y adaptación para el muy severo (IDEAM. 2019)

Ahora bien, en el caso de la degradación por erosión, se encuentra que, según la zonificación de la línea base de degradación de suelos por erosión, el 40%, equivalente a 45.379.057 ha, de la superficie continental de Colombia, presenta algún grado de degradación de suelos por erosión. Del 40% (45.379.057 ha) de la superficie continental e insular afectada por degradación de suelos por erosión en Colombia, el 20% (22.821.888 ha) presenta erosión ligera, el 17% (19.222.575 ha) erosión moderada, el 3% (3.063.204 ha) erosión severa y el 0,2% (271.390 ha) presenta erosión muy severa. La clase de erosión representa las manifestaciones o rasgos que genera en la superficie del suelo. La clase más dominante en el país es la laminar, en una proporción cercana al 50% del área con algún grado de erosión. La erosión por terraceo o también conocida como pata de vaca, es causada por el uso del suelo en ganadería mal localizada y manejada. Esta clase de erosión, afecta a 11.409.844 hectáreas del país que comprometen a 5.537.354 ha en el área hidrográfica Magdalena-Cauca y al 20.5% de su área, a 2.270.071 ha en la del Orinoco y al 6.5 % de su área, a 1.558.035 ha en la del Caribe y al 14,8% de su área, a 1.299.766 ha en la del Amazonas y al 3,7% de su área y 744.616 ha en la del Pacífico y al 9,6% de su área (IDEAM. 2015).

2.3. SODICIDAD DE SUELOS

2.3.1. Definición

A grandes rasgos, los problemas de salinidad de suelos son una consecuencia de la concentración de sales en zonas y profundidades donde la humedad del suelo se caracteriza por fuertes pérdidas de agua por evaporación y transpiración, además de la falta de un lavado de las sales residuales. En el caso puntual de los problemas de sodicidad, se dan como derivación de los cambios en la composición y concentración de las sales en solución, con cambios en los cationes intercambiables en equilibrio, lo que conlleva a una acumulación relativa de sodio en solución e intercambiable. Ambos procesos están determinados por los balances de agua y solutos (Pla, 2006).

El origen de los suelos sódicos también depende del predominio de climas semiáridos a áridos, y de percolaciones restringidas, pero requiere obligatoriamente de aguas de riego con baja conductividad eléctrica, y una composición iónica preferiblemente con predominio de HCO_3^- y Na^+ . Sin embargo, los efectos de sodicidad pueden desaparecer en suelos con altas concentraciones de sodio, en los casos en los que los aniones predominantes del suelo sean $\text{SO}_4 =$ o Cl la conductividad eléctrica del mismo sea alta (DRIESSEN & DUDAL, 1991).

El riego y el drenaje pueden causar cambios drásticos en el régimen y balance de sales y sodio en el perfil del suelo, resultando en problemas de salinización o sodificación dependiendo del clima, cultivos, suelos, profundidad del nivel freático, composición de las aguas de riego y freáticas, y del manejo del riego y del drenaje. Un drenaje restringido puede deberse tanto a la baja permeabilidad del suelo como a la presencia de niveles freáticos poco profundos (Pla, 2014) Aparte de ello, las aguas de drenaje provenientes de tierras bajo riego pueden contener no sólo sales naturales sino también residuos de fertilizantes químicos y pesticidas, los cuales se utilizan generalmente en cantidades relativamente altas en agricultura de riego, y también otros contaminantes derivados de residuos de animales y de materiales compostados utilizados como fertilizantes y enmiendas, y de aguas residuales (de origen urbano e industrial), más o menos tratadas, que se están utilizando en forma creciente para riego. Los principales problemas de sostenibilidad de la producción agrícola asociados con el uso de aguas residuales para riego, aparte de la posible contaminación por patógenos y metales pesados, son los de salinización y sodificación de los suelos (Halliwell, 2001; Pereira y Col, 2009).

2.3.2. Indicadores y valores de referencia

Capacidad de intercambio de cationes (CIC) y Porcentaje de sodio intercambiable (PSI).

La cantidad máxima por unidad de masa que un suelo puede adsorber se llama capacidad de intercambio de cationes. Se mide en meq por 100 gramos de suelo. Generalmente se mide a $\text{pH} = 7$. Es necesario especificar el pH porque éste afecta a algunas

cargas, de manera que la CIC decrece cuando aumenta la acidez. (Universidad Agraria de Guayaquil, 2004).

La CIC es diferente según los distintos tipos de arcillas, humus, etc., como se muestra en la siguiente tabla a continuación.

Tabla 4. Capacidad de intercambio de cationes

Material	CIC (meq/100 g)
Compuestos Húmicos	300-500
Turba	100
Montmorillonita	100
Vermiculita	120-150
Llita	30-60
Caolinita	10
Limo de cuarzo	< 0.01

Fuente: Recuperado del documento *La salinidad de los suelos y sus efectos en la agricultura*, escrito por Universidad Agraria de Guayaquil (Ecuador) Ministerio de Agricultura y Ganadería, Quito (Ecuador). Programa de Modernización de Servicios Agropecuarios. (2004).

En muchos casos el Ca representa el 80% de los cationes adsorbidos. En estos casos el suelo tiene buena estructura. En casos donde existen altas concentraciones de sodio en la solución del suelo, éste puede pasar a estar adsorbido y habrá repercusiones sobre la estructura del suelo.

En el estudio de los suelos salinos es de mucha importancia el porcentaje que el Na representa respecto a los demás cationes adsorbidos. Este porcentaje, expresando las cantidades en meq, se denomina porcentaje de sodio intercambiable (PSI) (Universidad Agraria de Guayaquil, 2004).

Capacidad de intercambio de cationes PNaI (PSI)

El PSI representa la saturación sódica de los suelos y es calculado como el porcentaje del sodio intercambiable respecto a la Capacidad de Intercambio de los suelos (Otero, 2013) El porcentaje de sodio intercambiable (PSI) está expresado con relación al

total de cationes intercambiables en el complejo de intercambio del suelo. Matemáticamente se calcula a través de la siguiente expresión:

$$PSI = \frac{[Na^+]}{CIC} \times 100$$

Donde $[Na^+]$ es la concentración de iones de sodio intercambiables y CIC la capacidad de intercambio catiónico ambas expresadas en cmol kg⁻¹. Se recomienda un PSI de 15 para definir el límite entre suelos sódicos y no sódicos. Sin embargo, la dispersión y rompimiento de agregados puede ocurrir a valores de PSI considerablemente más bajos (López, 2002).

En la tabla 4 se muestra la magnitud del PSI, presentando la clasificación de suelos según su PSI.

Tabla 5. Clasificación de suelos según su PSI.

Clase	PSI
No sódicos	< 7
Ligeramente sódicos	7 -10
Medianamente sódicos	15 – 20
Fuertemente sódicos	20 – 30
Muy fuertemente sódicos	> 30

Fuente: Recuperado del documento *La salinidad de los suelos y sus efectos en la agricultura*, escrito por Universidad Agraria de Guayaquil (Ecuador) Ministerio de Agricultura y Ganadería, Quito (Ecuador). Programa de Modernización de Servicios Agropecuarios. (2004).

2.3.3. Impactos en el suelo

Dependiendo de diferentes factores, los suelos pueden ser considerados cómo sódico con valores de PSI (y de RAS) que oscilan desde un 5% a un 40%. Precisamente, la falla generalizada de no entender ni evaluar adecuadamente los problemas de sodicidad de

los suelos (Oster y Shainberg, 2001), se debe a la gran variabilidad en la definición de suelos sódicos, con diferentes valores límite de PSI o de RAS, debido a diferencias en texturas y mineralogía de los suelos y a la falta de consideración de la concentración y composición de los otros electrolitos en solución. La sodicidad provoca cambios en las propiedades físicas de los suelos, tanto por dispersión de las partículas de arcilla y limo y ulterior taponado de los poros por dichas partículas en el agua percolante, y por el bloqueo de los poros por las arcillas expandibles. El taponado de los poros del suelo superficial por las partículas dispersas, suele provocar un sellado superficial del suelo que reduce la infiltración y provoca anegamiento superficial. Esto afecta el uso de la tierra y el crecimiento de las plantas, al reducir la permeabilidad al agua y al aire en el suelo superficial, con lo que se reduce la penetración de raíces. El impacto de estos mecanismos está determinado por diferentes factores del suelo, en especial por la textura, la mineralogía de las arcillas, la salinidad total y el pH (Rengasamy y Olson, 1991). La dispersión afecta más los suelos con arcillas no expandibles, ilitas y caolinitas, incluso a valores muy bajos de RAS si los niveles de salinidad total (C) se mantienen bajos, mientras que los efectos de hinchamiento son más comunes en suelos con arcillas expandibles, tipo smectitas.

2.3.4. Parámetros asociados a la Vulnerabilidad

- Tipo de arcillas

La arcilla está constituida por agregados de silicatos de aluminio hidratado, procedentes de la descomposición de minerales de aluminio. Presenta diversas coloraciones según las impurezas que contiene, siendo blanca cuando es pura. Surge de la descomposición de rocas que contienen feldespato, originada en un proceso natural que dura decenas de miles de años. Físicamente se considera un coloide, de partículas extremadamente pequeñas y superficie lisa. El diámetro de las partículas de la arcilla es inferior a 0.002 milímetros (Higuera et al., 2012)

Las arcillas se pueden clasificar en primarias y secundarias, según como se encuentran en la naturaleza. Las arcillas primarias son las que se encuentran en el mismo lugar en donde se formaron, es decir, no han sido transportadas por el agua o el viento. La única arcilla primaria conocida es el caolín, que tiene un grano más grueso y es menos

plástico, y en estado puro es casi blanco. Las arcillas secundarias son las que han sido transportadas del lugar en que se originaron; el agua es el elemento más común que las transporta, también el viento y los glaciares lo hacen; estos tipos de arcillas son mucho más comunes y se componen de más elementos como mica, hierro, cuarzo y otros minerales procedentes de diferentes fuentes (Higuera et al., 2012)

La sodicidad provoca cambios en las propiedades físicas de las arcillas, tanto por dispersión de las partículas de arcilla y limo y ulterior taponado de los poros por dichas partículas en el agua percolante, y por el bloqueo de los poros por las arcillas expandibles. El taponado de los poros del suelo superficial por las partículas dispersas, suele provocar un sellado superficial del suelo que reduce la infiltración y provoca anegamiento superficial. Esto afecta el uso de la tierra y el crecimiento de las plantas, al reducir la permeabilidad al agua y al aire en el suelo superficial, con lo que se reduce la penetración de raíces (Pla, 2014).

- Contenido de arcillas

La arcilla se caracteriza por su alta actividad química, principalmente porque es de naturaleza anfótera, que le confiere capacidad para atraer tanto cationes como aniones, aunque es más importante por su alta capacidad de retener e intercambiar cationes (Balaguera et al., 2011) además es un agente cementante que favorece la formación de agregados en el suelo (Bullinger-Weber, 2006). Por otra parte, Brady (2004) afirma que la influencia que ejercen las arcillas dependiendo de su composición mineralógica y la proporción en que ella interviene en los suelos incluye la velocidad de infiltración, el drenaje interno y la capacidad de retención de humedad, siendo más difícil el movimiento del agua y el aire en el suelo cuando el contenido de arcilla es mayor, pero la retención de agua y nutrientes es mayor.

El impacto de estos mecanismos está determinado por diferentes factores del suelo, en especial por la textura, la mineralogía de las arcillas, la salinidad total y el pH. La dispersión afecta más los suelos con arcillas no expandibles, ilitas y caolinitas, incluso valores muy bajos de RAS si los niveles de salinidad total (C) se mantienen bajos, mientras que los efectos de hinchamiento son más comunes en suelos con arcillas expandibles, tipo smectitas (Pla 2014)

Las relaciones entre salinidad del suelo y sus efectos flocculantes, sodicidad del suelo y sus efectos dispersantes o de hinchamiento, sobre las propiedades físicas del suelo, especialmente las relacionadas con la velocidad de infiltración y la conductividad hidráulica, se requieren para predecir como un determinado suelo se comportará bajo diferentes combinaciones previstas de salinidad y sodicidad. Estas relaciones dependen principalmente del tipo de arcilla, de ciertas reacciones químicas y de la textura del suelo. Entre las principales reacciones químicas en el suelo afectando esas relaciones salinidad/sodicidad están las que ocurren con los bicarbonatos y carbonatos de Ca, Mg y Na, y los sulfatos de Ca, que conducen a disoluciones o precipitaciones, con cambios en los niveles de salinidad y sodicidad (Pla, 2014).

- Contenido de materia orgánica

El contenido de la materia orgánica del suelo tiende a alcanzar un valor de equilibrio dependiendo del clima, porque de este depende la disponibilidad de agua y de la temperatura, factores que determinan la actividad microbiana que lleve a cabo la descomposición de los residuos orgánicos incorporados en el suelo, su humificación y mineralización; el uso del suelo también determina el contenido de MO, ya que condiciona la cantidad y composición de la materia orgánica que se incorpora, por lo tanto el cultivo continuo llega a disminuir la cantidad de MO (Barral et al.,1997); las interacciones de MO con otros componentes edáficos también influyen en su contenido. Para Ramírez (2009) la velocidad de descomposición del MO disminuye cuando aumenta el contenido de arcilla, óxidos y alófana, por otro lado, Barral et al. (1997) señalan que la adsorción de la MO sobre otras partículas de arcilla y la formación de complejos organometálicos con Fe, Al o Ca son factores importantes que determinan la evolución y contenidos de MO del suelo.

A lo anterior se le suma que la materia orgánica, además de ser un indicador de la fertilidad del suelo, mejora la estructura edáfica, la cual, a su vez, influye en la formación de micro y macroagregados, la continuidad de poros hacia la superficie y la infiltración de agua a todo el perfil mejora las condiciones de los suelos minerales; en los arenosos incrementa la capacidad de retención de agua y de nutrimentos, mientras que en los arcillosos los hace menos pesados y mejora su labranza. La materia orgánica actúa como la

reserva principal de nutrimentos del suelo y permite que las partículas se agrupen en forma de agregados, también reduce considerablemente la erosión del suelo, aumenta su fertilidad, por el contenido de humus, mejora la estructura e incrementa la captación de humedad (Ibarra et al., 2007) cuando existe un elevado porcentaje de sodicidad en los suelos, la materia orgánica se dispersa y disuelve, depositándose en la superficie, tomando color oscuro y dando origen al “álcali negro”. Un elevado PSI afecta las propiedades del suelo, e indirectamente los cultivos se ven perjudicados por el deterioro de ciertas propiedades como estructura o permeabilidad. (Herrada, 2009)

- Concentración salina en la fase soluble (Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo)

Los suelos sódicos presentan altos niveles de Na (acompañado de Mg en algunos casos) en el complejo de intercambio del suelo. Ese nivel de Na suele expresarse como “Relación de Adsorción de Sodio” (RAS) (USDA, 1954): $RAS = Na / ((Ca + Mg)/2)^{1/2}$ (meq/litro)^{1/2} o por el “Porcentaje de Sodio Intercambiable” (PSI = 100 Na/CIC), ambos relacionados uno con el otro. Es preferible y recomendable utilizar la RAS para fines prácticos, ya que el PSI es muy difícil de determinar correctamente en la mayoría de los suelos sódicos, y mucho más costoso, y por ello, según nuestra experiencia en muchos suelos sódicos, bajo muy diferentes condiciones, la RAS resulta más confiable como índice de sodicidad que el PSI. (Pla, 2014)

- pH

El pH establece la concentración de iones H⁺ y OH⁻, por lo tanto, la acidez o alcalinidad en el suelo (específicamente en la solución) se determina cuantificando la concentración de H⁺ u OH del extracto de saturación y se expresa con el potencial de hidrógeno (pH). Este se define como el logaritmo negativo de la concentración de iones H⁺ como lo muestra la ecuación: El pH es una equivalencia de iones H⁺ y OH⁻. Un aumento de iones H⁺ lleva a valores de pH bajos (ácidos), mientras que un aumento de OH conlleva a la alcalinidad, es decir valores más altos de pH (Lora, 2010).

En lo que se refiere a las propiedades físicas del suelo, los pH neutros son los mejores. Cuando el pH es muy ácido, hay una intensa alteración de minerales y la estructura se vuelve inestable. En suelos con pH alcalino, la arcilla se dispersa y se deteriora la estructura del suelo. En relación con las propiedades químicas, el pH condiciona la disponibilidad de nutrientes del suelo, ya que algunos nutrientes se pueden bloquear en determinadas condiciones de pH y no ser asimilables para las plantas. Así mismo, el pH determina la posibilidad de movilización de elementos tóxicos o de metales pesados en el suelo (Casas, 2012).

Cifras superiores a 8,5 puede indicar problemas graves de sodicidad. A partir de pH 8.5 el suelo comienza a considerarse "alcalino" que es un estado extremo de reacción básica (Orús et al., 2011).

Según Molina (2018) la categoría de suelo sódico, son de pH superior a 8,2 - 8,5 que, además, no son salinos. Esto se debe a que el extracto de saturación la suma de carbonatos más bicarbonatos es mayor que 1,5 meq/l. la clave de la alcalinidad (radica en la composición aniónica de la solución, que en este caso viene también determinada por la composición catiónica; esto es debido a la distinta solubilidad de los carbonatos de Ca y Na, una solución saturada de carbonato de Ca el pH es inferior a 8,2 - 8,5 porque su solubilidad relativamente baja limita la liberación de iones bicarbonato y carbonato. Una solución de carbonato de sodio, aún con una concentración por debajo del umbral de salinidad, tiene pH más alto porque es una sal muy soluble y libera a la solución los iones bicarbonato y carbonato suficientes para que el pH sea mayor que 8,2 - 8,5.

Dentro de las características adversas que cuentan los suelos sódicos respecto a las propiedades físicas:

- Dispersión de partículas → mala estructuración → propiedades hidráulicas y condiciones para ser laboreados desfavorables.
- El elevado porcentaje de sodio intercambiable, combinado con baja concentración de sales en la solución del suelo expande la solución de interface que rodea las partículas coloidales impidiéndoles unirse entre sí por fuerzas de van der Waals
- El pH alto hace que prácticamente todos los sitios de la superficie de los coloides capaces de desarrollar cargas eléctricas variables por asociación o

disociación de protones estén con carga negativa, lo que impide cualquier unión de partículas por floculación mutua. (Molina, 2018)

Dentro de las características adversas que cuentan los suelos sódicos respecto a las propiedades químicas:

- Toxicidad por el exceso de:
- Na
- Boro
- Molibdeno
- Fluor
- Deficiencias de nutrientes como: Ca, Mg, N, Fe, Mn, Zn y Cu (Molina, 2018).

Unidades de pH indican la reacción del suelo. Un pH de siete significa que el suelo es químicamente neutral; valores más bajos significan que el suelo es ácido (con una excesiva concentración de iones hidrogenados (fr) en el complejo de adsorción) y valores más elevados indican alcalinidad [una predominancia de calcio (Ca²⁺) y/o de cationes de sodio (Na⁺)] (FAO, 2002).

- Prácticas de fertilización

En principio, hay que decir que existen distintos tipos de fertilizantes. Por fertilizante se entiende a toda sustancia o mezcla de sustancias que, incorporada al suelo o aplicada sobre la parte aérea de las plantas, suministre el o los elementos que requieren los vegetales para su nutrición, con el propósito de estimular su crecimiento, aumentar su productividad y mejorar la calidad de las cosechas (Golik, 2017). Estas sustancias pueden ser minerales u orgánicas. Los fertilizantes naturales pueden ser sintéticos, como el fosfato diamónico o el nitrato de amonio, o naturales como el fosfato de roca o el nitrato de sodio. Los fertilizantes orgánicos pueden provenir de residuos de origen animal (estiércol) o vegetal (cascarilla de arroz, viruta de madera).

Mientras que los fertilizantes minerales aportan sólo el o los nutrientes que contienen (por lo general no más de tres o cuatro, y en cantidades específicas), los orgánicos hacen un aporte mucho más completo y complejo de nutrientes y también proveen materia orgánica, pero requieren de un manejo bastante más dificultoso. La fertilización debe contemplar el tipo de suelo y tender a un balance de nutrientes

equilibrado. A su vez, puede hacerse utilizando fertilizantes minerales o compuestos orgánicos (Golik, 2017)

El pH del suelo (o del sustrato de cultivo) determina la asimilabilidad de los nutrientes; y los fertilizantes tienen una importante influencia sobre dicho pH. La incidencia de los fertilizantes sobre el pH del suelo depende principalmente de: a) el perfil acidificante de la composición química del fertilizante b) de su carácter descalcificante o calcificante y c) de la capacidad tamponadora del suelo (Ginés & Mariscal, 2002).

Fertilizantes alcalinizantes

Los fertilizantes alcalinizantes apenas se usan comercialmente. En este grupo se puede incluir:

- Fosfatos naturales: (de los cuales hay un importante yacimiento en el antiguo Sahara español) tienen riquezas variables y con la excepción de los fosfatos aluminocálcicos de Thiés (Senegal) son fosfatos tricálcicos y por lo tanto con un comportamiento basificante al igual que las escorias de Thomas, que provienen de "desechos" de la industria siderúrgica combinados a alta temperatura con cal (Ginés & Mariscal, 2002).

- Nitrato de cal ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$); se considera un fertilizante de efectos basificantes, debido a su contenido en calcio (28% CaO).

El CaCO_3 no se considera un fertilizante, aunque actúe como tal en suelos carentes de Ca y sea considerado el principal enmendante de los suelos ácidos (Ginés & Mariscal, 2002).

- Prácticas de riego

De manera muy amplia, el riego consiste en la aplicación artificial de agua al terreno para que los cultivos obtengan la humedad necesaria para su desarrollo, para proporcionar nutrientes en disolución, asegurar las cosechas contra sequías de corta duración, refrigerar el suelo, disolver y reducir el contenido de las sales contenidas en el suelo. A esto se le debe sumar que es necesario pensar el cuánto, el cuándo y el cómo debe realizarse el proceso de riego, con el fin de aprovechar al máximo el agua que se aplique con la mayor eficiencia y rendimiento para la producción. El riego tiene diferentes

métodos, que dependen de la necesidad del suelo: el Superficial, el cual distribuye por la superficie del campo por la gravedad con surcos, melgas, cuadros o terrazas; el método por aspersión en el cual se distribuye el agua en forma de lluvia artificial con equipo especial de rociado; el riego por goteo, en donde el agua se suministra en forma de gotas directamente a la zona radicular de cada planta; y por último el riego subterráneo, en donde se humedece el suelo por medio de humificadores colocados debajo de la planta, entre 40 y 45 cm, también se puede regar a través del control de niveles freáticos, donde se mantiene la humedad del terreno en niveles deseados (Cisneros, 2003)

El riego, unido a buenas prácticas agropecuarias, debe reflejarse en aumentos importantes de productividad. Sin embargo, en Colombia las diferencias en productividad derivadas del uso del riego no son tan grandes como se podría esperar. Lograr los aumentos potenciales en productividad requiere, entre otras cosas, usar el suelo según su vocación, contar con un buen sistema de extensión y asistencia técnica agrícola y tener acceso efectivo al riego. Puede concluirse que las políticas públicas sobre riego se han estado orientado hacia unos pocos productores agropecuarios que cubren áreas aún menores, mientras el grueso de los agricultores y de las áreas prácticamente pasa desapercibidos para las acciones gubernamentales en materia de irrigación. (Perfetti, Delgado, Blanco, Paredes, Et, al; 2019).

El 89% del área total del distrito cuenta con un método de riego, siendo el de surcos el más implementado, con un 52% del área total en 598 predios (Tabla 6). Los surcos son canales abiertos que se aprovechan de la pendiente del territorio para llevar el agua hasta el cultivo, al ser abiertos, se presenta una alta pérdida del recurso en la distribución, por lo que la eficiencia de aplicación es solo de 50%. El método que muestra mayor eficiencia de aplicación es el goteo, con un índice de 90%, es utilizado en 297 predios que corresponden a un área de 1.692 hectáreas. Solo el 11% del distrito carece de riego (Perfetti, Et, al; 2019).

Tabla 6. Métodos de riego usados en el distrito de riego RUT

Método de riego	Área (ha)	% Área	No. predios
Surcos	5.476	52	598
Aspersión (cañones)	2.055	19	510
Goteo	1.692	16	297
Mateado	180	2	124
Microaspersión	60	1	10
Sin Riego	1.104	11	468

Fuente: (Perfetti, Et, al; 2019)

Según Céspedes (1998) los riegos superficiales o gravitacionales sirven también para lavar los suelos del exceso de sales. El problema de estos métodos de riego es la alta cantidad de agua que usan para regar, Los métodos de riego tecnificados de aplicación localizada del agua, como goteo y microaspersión, resultan positivos por su alta frecuencia de aplicación de agua (pudiendo ser diaria) y debido a que emplean bajos volúmenes gracias a su alta eficiencia. Pero estos sistemas de riego deben ser muy bien manejados, ya que de lo contrario causan salinización por la forma de distribución del agua. En el caso de usarse un sistema de riego por aspersión para lavar el suelo, el sistema de riego por goteo debería considerar acoples rápidos y presión extra para el trabajo de los aspersores. No obstante, debe tenerse presente que con cualquier método de lavado se debe contar con excelentes condiciones de drenaje del suelo.

Según García, (2009) un manejo adecuado de riego incluye el uso periódico de excesos de agua para lavar las sales acumuladas en el perfil radicular. Esto involucra los conceptos de lavado de los suelos, de fracción de lavado y el requerimiento de lavado.

El método de riego empleado tiene una gran influencia tanto en la acumulación y la distribución de las sales en el perfil del suelo como en la producción del cultivo (Ruiz 2017).

Para evitar la acumulación de sales en la superficie como resultado del uso del riego por gravedad puede usarse el riego por aspersión. Este requiere el uso de agua de muy

buena calidad para prevenir daños al follaje como consecuencia de la concentración de sales, especialmente cloruros y sodio, sobre la superficie de las hojas (García, 2009)

En el riego por surcos, la salinidad se incrementa preferentemente en ciertas áreas, según la forma de los surcos o de los caballones, lo que puede permitir a las plantas escapar de las altas concentraciones de sales. El riego por inundación en superficies bien niveladas permite aplicar agua de peor calidad que en otros métodos, ya que el control de la salinidad es más sencillo. Sin embargo, en ambos métodos de riego, el consumo hídrico es muy alto y éste es un parámetro que, en zonas áridas y semiáridas es muy importante, más aún si la textura del suelo es gruesa y la infiltración es alta (Losada, 1997).

Por otra parte, el riego por aspersión ofrece la posibilidad de aplicar cantidades inferiores de agua a las que se necesitan en los riegos por superficie. El principal inconveniente de aplicar aguas salinas con este método de riego es que las sales entran en contacto con la superficie foliar y al ser absorbidas provocan daños directos (quemaduras) (Maas, 1990).

En cuanto al riego por goteo, evita el daño en las hojas y disminuye el consumo de agua, conservando la humedad del suelo alta, lo que permite mantener baja la concentración de sales debido a la frecuencia de las aplicaciones. Es especialmente beneficioso en los suelos arenosos que tienen una baja capacidad de retención de agua y donde la variación en el contenido de agua durante el intervalo de riego es más pronunciada que en suelos de texturas más gruesas. El único inconveniente es la necesidad de eliminar las sales que se acumulan en el frente del bulbo (Ruiz 2017).

Por último, con los sistemas de riego subsuperficial, el principal inconveniente es el lavado de la zona por encima del emisor, ya que la evaporación y el movimiento ascendente de las sales puede causar la acumulación de las mismas cerca de la superficie, pudiendo alcanzar niveles que pueden llegar a ser tóxicos (Ruiz 2017).

La presencia de sales en el agua de riego es una de los principales causas de salinización de los suelos (García, 2009).

La cantidad de agua que debe pasar a través del perfil para lavar las sales depende de tres factores: 1) la salinidad inicial; 2) la técnica de aplicación del agua; y 3) la textura del suelo. La técnica de lavado más corriente es la inundación en piscinas que puede ser

permanente o intermitente. El riego por aspersión usando grandes volúmenes de agua también se puede usar (García, 2009).

Las actividades del hombre añaden sales a los suelos en forma continua y pueden causar salinización, como en el caso del riego, aún cuando se utilicen aguas de buena calidad. La sobreirrigación de algunas áreas puede resultar en el transporte y acumulación de sales a áreas vecinas con drenaje pobre o insuficiente (García, 2009).

2.4. CONCEPTO DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO

2.4.1. Amenaza o peligro

Es la representación de un peligro latente asociado con un fenómeno físico de origen natural o artificial que puede presentarse en un sitio específico y en un tiempo determinado, produciendo efectos adversos en las personas, los bienes o el medio ambiente, expresado como la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un evento con una cierta intensidad en un cierto sitio y en un cierto periodo de tiempo (Cardona, 1993) Un proceso, fenómeno o actividad humana que pueden ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos en la salud, al igual que daños a la propiedad, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales (FAO et al., 2018) también se puede reconocer el concepto de amenazas naturales se las caracteriza como aquellos procesos del medio ambiente físico que, por la gran magnitud que pueden o suelen alcanzar, son capaces de provocar cambios importantes en el paisaje o de alterar su condición de equilibrio de forma más o menos prolongada, según sea el tipo de proceso, el área afectada y la recurrencia (Ferrando & Fransisco, 2003)

2.4.2. Vulnerabilidad

Puede entenderse como la predisposición intrínseca de un sujeto o elemento a sufrir daño debido a posibles acciones externas (Cardona. 1993) como las condiciones determinadas por factores o procesos físicos, sociales, económicos y ambientales que aumentan la susceptibilidad de una persona, una comunidad, los bienes o los sistemas a los efectos de las amenazas (FAO et al., 2018) El término puede aplicarse a una persona o a un grupo social según su capacidad para prevenir, resistir y sobreponerse de un impacto. Las

personas vulnerables son aquellas que, por distintos motivos, no tienen desarrollada esta capacidad y que, por lo tanto, se encuentran en situación de riesgo (Yañez et al., 2017). El concepto de vulnerabilidad tiene sus cimientos en las diferencias socioeconómicas que se dan en la sociedad, comprendiendo que se refiere a desventajas o riesgos que la movilización de los activos del que disponen las personas, hogares, comunidades y territorios, no permitan aprovechar oportunidades de integración y movilidad social o contrarrestar riesgos de pérdida de bienestar (Arriagada, 2001)

2.4.3. Riesgo

Es la Convolución de la probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos y de la vulnerabilidad de los elementos expuestos a tales amenazas, matemáticamente expresado como la probabilidad de exceder un nivel de consecuencias económicas y sociales en un cierto sitio y en un cierto periodo de tiempo. De esta manera se puede diferenciar la amenaza y el riesgo en que la primera se relaciona con la probabilidad de que se manifieste un evento natural o un evento provocado, mientras que la segunda se relaciona con la probabilidad de que se manifiesten ciertas consecuencias, las cuales les están íntimamente relacionadas no sólo con el grado de exposición de los elementos sometidos, sino con la vulnerabilidad que tienen dichos elementos a ser afectados por el evento (Cardona. 1993) también se reconoce como la probabilidad de ocurrencia de fenómenos o tendencias peligrosas multiplicada por los impactos si estos fenómenos o tendencias llegasen a producirse (FAO et al., 2018)

Por lo anterior, Ferrandes & Fransisco (2003) explican que el riesgo corresponde a una situación de exposición a una Amenaza Natural por parte asentamientos, obras u actividades humanas. Es, por lo tanto, un problema de localización o selección de sitio de emplazamiento. El nivel de Riesgo se establece en relación con el tipo de Amenaza, el tipo de actividad o uso del suelo, y a la vulnerabilidad intrínseca para soportar o absorber la energía de está en su proyección. En este sentido, el Riesgo es el resultado de la interacción entre la dinámica del medio ambiente natural y el medio ambiente construido. Por lo tanto, se puede concebir el Riesgo como una creación humana, una construcción social producto del “desconocimiento” de la dinámica y alcance de los procesos naturales en sus manifestaciones extremas, situación a la que se suman los problemas socioeconómicos, los culturales y la carencia de cuerpos normativos que regulen adecuadamente el uso del

espacio, y propendan a alcanzar una situación de seguridad civil estable (Ferrando & Fransisco, 2003).

2.4.4. Gestión del riesgo

Se refiere a un proceso social complejo a través del cual se pretende lograr una reducción de los niveles de riesgo existentes en la sociedad y fomentar procesos de construcción de nuevas oportunidades de producción y asentamiento en el territorio en condiciones de seguridad y sostenibilidad aceptables. El aprovechamiento de los recursos naturales y del ambiente, en general, debe desarrollarse en condiciones de seguridad dentro de los límites posibles y aceptables para la sociedad en consideración. En consecuencia, significa un proceso de control sobre la construcción o persistencia de amenazas y vulnerabilidad (Lavell, 2001). También se entiende la gestión del riesgo como la aplicación de políticas y estrategias relacionadas con la reducción del riesgo a fin de prevenir la aparición de nuevos riesgos de catástrofes, reducir los riesgos existentes y gestionar los residuales por medio del fortalecimiento de la resiliencia y la reducción de las pérdidas ocasionadas por los desastres (FAO et al., 2018) La Gestión de los Riesgos también incluye los procesos relacionados con llevar a cabo la planificación de la gestión, la identificación, el análisis, la planificación de respuesta a los riesgos, así como su seguimiento y control. Los objetivos de la gestión de los riesgos son aumentar la probabilidad y el impacto de eventos positivos, y disminuir la probabilidad y el impacto de eventos negativos (Project Management Institute, 2010).

2.4.5. Fases de la gestión del riesgo

2.4.5.1. Identificación

Son los aspectos que pueden ser considerados de importancia para la elaboración y diseño de un Plan de Prevención de Riesgos; es el proceso de levantamiento de información necesaria para que se decida la oportunidad de adoptar acciones preventivas y establecer las prioridades pertinentes (Lavell, 2001). Consiste en el análisis de la información obtenida a través de un listado de aplicación, con la finalidad de evaluar la gestión preventiva. Esta evaluación inicial, identificación o diagnóstico proporcionará un conocimiento real sobre la

importancia y el nivel de los riesgos inherentes a la actividad desarrollada por cada organismo (Quintanilla et al., 2011) también puede ser vista como el reconocimiento de políticas, medidas y acciones capaces de permitir la toma de decisiones consecuentes con los objetivos del desarrollo y la preservación de la población, el desarrollo económico y social alcanzados y la calidad ambiental; además de los peligros, vulnerabilidades y riesgos y el conjunto de acciones, medidas que contribuyan a minimizar los efectos derivados del desencadenamiento de eventos naturales severos en un contexto construido por el hombre en el tiempo y la localidad (Rodríguez, 2009).

2.4.5.2. Prevención

Medidas y acciones dispuestas con anticipación con el fin de evitar o impedir que se presente un fenómeno peligroso o para evitar o reducir su incidencia sobre la población, los bienes y servicios y el ambiente (Lavell, 2001) identificar las medidas o conjunto de medidas específicas de ingeniería, legislativas, conductivas, entre otras, diseñadas para proporcionar protección contra los efectos del desastre, considerando peligros específicos, para ser implementadas en el tiempo, mientras no se producen situaciones de urgencia o emergencia (Rodríguez, 2009). Puede ser entendido como la reducción del peligro o la amenaza, en cualquier caso, para que esta se reduzca a “0” es altamente difícil, ya que no existe una tecnología en la actualidad para controlar un terremoto, un huracán, una erupción volcánica, entre otros peligros (Rojas & Martínez, 2011). Se reconocen como el papel de la predicción a corto, medio y largo plazo; los agentes implicados en los sistemas de alerta; la necesaria educación del comportamiento frente al riesgo así como algunos aspectos relativos a la legislación y sistemas de seguros en relación con los riesgos naturales; comprende la planificación y ejecución de medidas y acciones que pretenden evitar o impedir que se presente un fenómeno potencialmente destructivo (cuando ello es posible) o para evitar los niveles de exposición, ante los ya existentes (evadir el probable impacto sobre la población, sus bienes y servicios y su ambiente soporte) (Thomas, 2011).

2.4.5.3. Mitigación

Planificación y ejecución de medidas de intervención dirigidas a reducir o disminuir el riesgo. La mitigación es el resultado de la aceptación de que no es posible controlar el riesgo totalmente; es decir, que en muchos casos no es posible impedir o evitar totalmente los daños y sus consecuencias y sólo es posible atenuarlas (Lavell, 2001) son medidas de prevención que se adoptan con antelación para reducir la amenaza, la exposición y disminuir la vulnerabilidad de las personas, los medios de subsistencia, los bienes, la infraestructura y los recursos ambientales, para evitar o minimizar los daños y pérdidas en caso de producirse los eventos físicos peligrosos. La reducción del riesgo la componen la intervención correctiva del riesgo existente, la intervención prospectiva de nuevo riesgo y la protección financiera (Ministerio de Ambiente, 2014) El concepto de mitigación, corresponde a la vulnerabilidad, a reducir o eliminar la incapacidad de la comunidad para absorber los efectos de un cambio en el ambiente (Rojas & Martínez, 2011) es el reconocimiento de que no es posible evitar completamente la exposición ante el evento potencialmente destructor, y se es, en consecuencia, en cierta medida vulnerable ante este; es decir, es aceptar que no es posible llevar hasta cero el nivel de riesgo y consiguientemente la opción es reducirlo para convivir con este. La mitigación, entonces, involucra las medidas y acciones que buscan reducir la vulnerabilidad de la población y sus bienes y servicios, así como atenuar el posible impacto a sufrir por ellos ante la ocurrencia del evento destructor (Thomas, 2011)

2.4.5.4. Preparación

La preparación involucra todas aquellas medidas cuyo objetivo es organizar y facilitar los operativos, en caso de emergencia y/o desastre, para el efectivo y oportuno aviso, las labores de salvamento, así como la posterior rehabilitación de la población. La preparación se lleva a cabo mediante la organización y planificación de las acciones de alerta, evacuación, búsqueda, rescate, socorro y asistencia, que deben realizarse en caso de emergencia y las iniciales de rehabilitación que garantizan la estabilización de los sistemas operativos y las edificaciones (Thomas, 2011) son medidas cuyo objetivo es organizar y facilitar los operativos para el efectivo y oportuno aviso, salvamento y rehabilitación de la

población en caso de desastre. La preparación se lleva a cabo mediante la organización y planificación de las acciones de alerta, evacuación, búsqueda, rescate, socorro y asistencia que deben realizarse en caso de emergencia (Lavell, 2001) se refiere también a la planificación de acciones para las emergencias, el establecimiento de alertas y ejercicios sistemáticos de evacuación para una respuesta rápida y efectiva durante una emergencia o desastre (Rodríguez, 2009).

2.4.5.5. Atención del desastre

Corresponde a la ejecución de las acciones previstas en la etapa de preparación y que, en algunos casos, ya han sido anteceditas por actividades de alistamiento y movilización, motivadas por la declaración de diferentes estados de alerta (Lavell, 2001) son el conjunto de acciones y medidas utilizadas durante la ocurrencia de una emergencia o desastre a fin de minimizar sus efectos. Se requieren decisiones y acciones rápidas y eficientes, implica efectuar evacuaciones para asegurar la supervivencia de los damnificados y satisfacer sus necesidades inmediatas de seguridad, alimentación, salud y dar seguridad a sus bienes. Especial énfasis debe darse al tema de género, niñez y ancianidad, pues en todos los casos de desastre son los componentes más vulnerables de la sociedad (Rodríguez, 2009). Es básicamente preventivo, con el fin de minimizar los daños posibles al medio ambiente y la población. Debe poner énfasis en la capacitación en prevención de riesgos y medidas de emergencia, así como un eficiente programa de comunicación que permita una adecuada información entre la comunidad, las empresas, el gobierno local, prensa e instituciones públicas (Martínez, 2003)

2.4.5.6. Recuperación

Es el proceso de restablecimiento de condiciones adecuados y sostenibles de vida mediante la rehabilitación, reparación o reconstrucción del área afectada, los bienes y servicios interrumpidos o deteriorados y la reactivación o impulso del desarrollo económico y social de la comunidad (Lavell, 2001) y puede ser vista como la planificación prevista desde el inicio de un proceso de riesgo, que puede modificar las orientaciones técnicas que permitan evitar la pérdida o reducción de la capacidad productiva de los recursos ambientales, ofreciendo soluciones para que el área impactada recupere nuevamente

condiciones de equilibrio dinámico con su entorno (Martínez, 2003) es el complejo proceso de restablecimiento de condiciones adecuadas y sostenibles de vida mediante la Rehabilitación y Reconstrucción del área afectada, los bienes y servicios interrumpidos o deteriorados y la reactivación o impulso del desarrollo económico y social de la comunidad (Thomas, 2011).

3. ESTADO DEL ARTE

Desde tiempos muy antiguos se conocen los efectos de la acumulación de las sales en los suelos y cultivos y existen registros históricos de migraciones efecto de la presencia de dichos minerales, forzando la búsqueda de mejores regiones para la producción agrícola. Los suelos salinos y suelos sódicos normalmente se evidencian en compañía en el suelo. Sin embargo, existe diferencia entre ellos, siendo los suelos salinos aquellos que contienen cantidades importantes de sales más solubles que el yeso, mientras que los suelos sódicos se originan en el desplazamiento de bases del complejo de absorción de la solución micelar por el ion monovalente sodio. (Courel, 2019). En cualquiera de los casos, se afecta el rendimiento de los cultivos y la productividad y estructura del suelo presentando problemas de disponibilidad de agua y nutrientes (Arora, 2017). A largo plazo, los procesos de salinización y sodificación junto con la erosión, la deforestación, contaminación del suelo, quemas, uso excesivo de agroquímicos, mal uso del riego, cambios abruptos del uso del suelo, entre otros, desencadenan en la desertificación de la tierra y pérdida total del suelo (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible, 2005) (FAO y UNEP, 1984)

El tema de estudio del presente trabajo ha sido evaluado por múltiples instituciones públicas y privadas que han realizado diagnósticos de vulnerabilidad de los suelos por procesos salinización y sodificación en cuencas hidrográficas, áreas agrícolas, distritos de riego, sistemas de riego, entre otros, utilizando modelos de análisis multicriterio y sistemas de información geográfico. A través del presente, traemos a colación algunos de esos estudios.

De acuerdo al Servicio de Gestión de Tierras y Nutrición Vegetal de FAO, (citado por Arora, 2017), alrededor de 400 millones de ha, equivalente al 6% de la superficie del planeta, poseen problemas de salinidad y sodicidad, siendo Australia el país con mayor extensión de tierras bajo esta condición. Además, esta misma organización junto con Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo GTIS (2015) realizaron un informe técnico evaluando las amenazas de la degradación del suelo en el mundo clasificado por regiones,

incluida la salinización y sodificación del mismo. A través de la tabla 7, se observa un resumen del informe para esta amenaza.

Tabla 7. Evaluación de la amenaza salinización / sodificación en los suelos del mundo.

REGIÓN	RESUMEN
Asia	La amenaza de la salinización/sodificación está extendida pero es variable, principalmente en las zonas áridas y semi-áridas del centro de Asia. Por otro, en áreas costeras en zonas de monzón principalmente por la invasión de agua salada en el Sur y Sudeste de Asia.
Europa y Eurasia	Es una amenaza generalizada en el área central de Asia y muy presente en algún área de España, Hungría, Turquía y Rusia.
Latinoamérica y el Caribe	En la región estas amenazas son causadas principalmente por la inadecuada tecnología de riego, calidad del agua y cambio abrupto del uso de la tierra.
Cercano Oriente y Norte de África	La salinización/sodificación es un problema generalizado en la región debido a las altas temperaturas, las actividades agrícolas, las prácticas inapropiadas de riego, políticas del territorio e intrusión del agua marina en zonas costeras.
América del Norte	Se observa una creciente salinización/sodificación en algunas partes del norte de las llanuras en EE.UU., asociados a los cambios inducidos por el clima en el sistema hidrológico y su respuesta antrópica.
Sudoeste del Pacífico	El problema de la salinización/sodificación es un problema ampliamente extendido y costoso en Australia y algunas islas Atolones, causado por los largos periodos de sequía. Se estima que el tiempo para la recuperación del suelo tarde probablemente varios años o décadas.

Fuente: FAO Y GTIS (2015)

Por otro lado, la Comisión Europea (2009) menciona problemas de salinización y sodificación en países como Hungría, Rumania, Grecia y la Península Ibérica.

A nivel Latinoamérica, Argentina es el país que presente la mayor extensión de territorio con problemas de salinización y sodificación. En un estudio realizado por Sánchez, Dunel Guerra y Scherger a través del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria e implementando sistemas de información geográfico (2015), los autores evaluaron la áreas afectadas por salinidad y/o sodicidad bajo riego, clasificando el país en cuatro regiones: 1) región Pampeana y Noreste; 2) la región de Cuyo; 3) la región de Noa y 4) la región Patagonia. El estudio fue realizado en 1'749.522 ha, correspondiente al 83.3% del territorio nacional bajo riego de las cuales, 412.338 ha (23.5%) presentan algún grado de afectación en categorías de leve, moderado o grave. Analizando las cuatro regiones, la Región Patagonia es la más afectada con un 36% de su territorio (45.089 ha), seguido por la región de cuyo (28.3 %), luego la región Pampeana y Noreste (27%) y finalmente la región Noa (11%). La región Patagonia es la más afectada debido a que en la zona Chubut el deficiente manejo del riego, la elevación del plano freático y sobre todo la presencia de suelos de naturaleza argílica que dificultan un drenaje adecuado (más que la calidad del agua), generan un coeficiente más elevado de vulnerabilidad. Caso contrario en Buenos Aires, en la región Pampeana y Noreste, donde los elevados índices de afectación están vinculados a la aplicación del agua con alta concentración de bicarbonato y sodio lo cual genera algún grado de deterioro en el suelo como aterronamiento excesivo, dificultad en las labores y pérdida de la capacidad de emergencia en los cultivos, entre otros. En síntesis, del total del área afectada, el 41.3% está relacionada con procesos de sodificación, mientras que el 58.7% está relacionada a procesos puros de salinización o una sinergia entre ambos. Finalmente, los autores destacan la importancia de implementar herramientas como el drenaje a cielo abierto o entubado, la aplicación de enmiendas y el ajuste de láminas de riego para la recuperación de al menos el 20% de la superficie afectada con condiciones de reversibilidad inmediata.

En la región latinoamericana, la adecuación de tierras y el riego han desempeñado un rol importante en las economías de los países a través de la generación de empleo,

disminución de la pobreza en las zonas rurales y la diversificación de los cultivos. Países como Brasil, Chile, Perú y México tienen un sector agropecuario dinámico, además de mostrar importantes avances y desarrollo en esta materia. En general, la disponibilidad de recurso hídrico renovable y la cantidad de infraestructura hidráulica en estas cuatro naciones difieren. Brasil, por su parte, solo el 2% del territorio con vocación agrícola posee infraestructura de riego. Chile y Perú son privilegiados por contar con suficientes recursos hídricos pero afectados por su compleja topografía que genera una distribución desigual del recurso y requiere una mayor inversión en infraestructura. En el otro extremo se encuentra México, con dos tercias partes de su territorio nacional catalogadas como áridas y semiáridas; sin embargo, más del 30% del área cultivada (alrededor de 7.6 millones de ha) es irrigada. Sea cualquiera de los casos, los cuatro países tienen en común que presentan problemas en la distribución de los recursos hídricos, lo cual genera una sobreexplotación de los recursos y en consecuencia un incremento de los procesos de salinización y sodificación del suelo. Actualmente, los proyectos de adecuación de tierras están destinados a la rehabilitación de sistemas de riego existentes, modernización de los sistemas de conducción, mejores vías de acceso para aumentar la comercialización de los productos y obras para mejorar el drenaje de las tierras y así reducir la salinidad de los suelos (Perfetti, y otros, 2019).

Otro caso latinoamericano es Colombia. De acuerdo al documento de la Política para la Gestión Sostenible del Suelo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016), el 5% de los suelos del área continental del país presenta susceptibilidad a problemas de salinización y sodificación, siendo la región caribe la más afectada, con un 68% del total del territorio (53.237 km²). En la región pacífica, el 5% del área presenta susceptibilidad de moderada a alta y 1.948 km² ya evidencia problemas de salinización y sodificación. Finalmente, el autor menciona que el 10% de la región andina presente susceptibilidad de moderada a alta y el 2% ya poseen estas condiciones, encontrándose esta limitante en los distritos de riego, como el distrito de riego Roldanillo-Unión-Toro en el Valle del Cauca. En este distrito, existe problemas de salinidad y sodificación en aproximadamente el 36% del área total, equivalente a 3600 ha (IGAC, IDEAM y MAVDT, 2010). A nivel departamental, el panorama es similar, que de las 299.266 ha de la zona

plana del valle geográfico del río Cauca dedicadas a la agricultura, 85.000 ha poseen altos niveles de salinidad y sodificación con el mal drenaje de la zona (Echeverri S., Pérez y Urrutia C., 2015 citado de Romero L., 2013).

Similar al caso argentino, en Colombia los procesos de salinización y solidificación son causados por el mal manejo y operación de los sistemas y distritos de riego. Este panorama es un evidente llamado a mejorar las prácticas de irrigación y drenaje, teniendo en cuenta que solo el 33% de las Unidades de Producción Agropecuaria (UPA) del país que tienen cultivos con algún tipo de riego para el desarrollo de sus actividades agropecuarias, según cifras del último Censo Nacional Agropecuario (2014). Además, Según la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria UPRA (2018) gracias a su riqueza natural en tierras y disponibilidad de agua, Colombia cuenta con 17'030.758 ha aptas para irrigación. La mayoría de este potencial está ubicado en la región orinoquia (46%), seguido por la región andina (22%) y el Caribe (21%). Las regiones pacífico y amazonia presentan bajo potencial para adecuación de tierras, con un 9% y 2% respectivamente. Cabe mencionar que el potencial para adecuación de tierras del país se ha visto afectado por la lenta ejecución de la construcción de los distritos de riego Rancheria, Triangulo del Tolima y Tesalia-Paicol, proyectos que concentran la inversión pública en esta materia, mostrandose un leve crecimiento en la implementación de riego en el país sustentados en la pequeña irrigación (Perfetti, y otros, 2019).

Respecto a la metodología de trabajo, investigadores como Echeverri S, Pérez y Urrutia C. (2015) evaluaron el riesgo de salinización del suelo en el distrito RUT empleando la metodología de análisis multicriterio, en el cual, además de valorar la importancia de cada parámetro, se integran al análisis aquellos que son cualitativos y tienen en cuenta las observaciones del expertos en la materia. De igual modo, se utilizan los sistemas de información geográfico para la realización de los análisis geoestadísticos y zonificación de la vulnerabilidad. Finalmente el autor concluye que 1) es posible utilizar esta herramienta en la gestión del riesgo de degradación de suelos en general y 2) la calidad de los resultados está estrechamente relacionada con la calidad de información de entrada.

Esta misma metodología de análisis multicriterio ha sido empleada para medir la vulnerabilidad biofísica a los riesgos por inundación en zonas poblacionales en México. Algunos ejemplos de investigaciones fueron realizadas en la zona metropolitana de Toluca por Mendoza M. y Orozco H. (2014) y en la subcuenca río Atoyac – Oaxaca de Juárez por Chávez, Binnqüist y Salas (2017).

Y es tal la importancia de estas herramientas y los sistemas de información geográfico que en el país se creó el Programa Nacional de Monitoreo y Seguimiento de la Degradación de Suelos y Tierras en Colombia, liderado por MADS e IDEAM con el objetivo de hacer frente a las problemáticas de desertificación, degradación, salinización, entre otros que afectan la seguridad alimentaria, la biodiversidad, la regulación de los ciclos hidrológicos y aumenta los riesgos de inundaciones, avalanchas, incendios y emisiones de gases de efecto invernadero (Sánchez L., y otros, 2012).

Un ejemplo de la implementación de sistemas de información geográfico es el trabajo realizado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR (2018), quienes realizaron el diagnóstico y monitoreo de degradación de suelos por salinización en la cuenca del río Machetá. A través de una zonificación preliminar de la cuenca y un muestreo en campo se concluyó que “no existe un área importante de la subcuenca del río Machetá con procesos y grados de salinización” puesto que los parámetros evaluados como la conductividad eléctrica CE, pH y el porcentaje de sodio intercambiable PSI se encuentran en los rangos normales en toda el área estudiada. Sin embargo, se implementaron medidas de mitigación para evitar futuros procesos de salinización y sodificación en la zona, puesto que en la zonificación preliminar basada en el uso y vocación del suelo, coberturas vegetales, sistemas de riego y actividades antrópicas, se evidencian áreas con susceptibilidad a estos procesos.

Por otro lado, también es posible la combinación de los SIG con programas de apoyo, como lo realiza Lugo M. y Rey (2009) para evaluar la vulnerabilidad de degradación agroambiental de suelos en el sector Río Orituco-Chaguaramas del Estado

Guárico en Venezuela. El sistema MicroLEIS¹ en combinación con el uso de un SIG, permitió a los investigadores localizar la unidades de tierra con alta vulnerabilidad a los procesos de erosión hídrica y agrocontaminación, indicando las causas relacionadas con los riesgos con el fin de aplicar prácticas alternativas agrícolas para reducir estos problemas.

Otro aspecto a resaltar es la aplicación de modelos matemáticos para el diagnóstico y predicción de los problemas de salinidad y sodicidad en los suelos. El investigador Pla (2014) (2010) menciona el modelo matemático “SALSODIMAR” (creado por el mismo) con dicho objetivo basado en los procesos hidrológicos e impactos asociados a los procesos de salinización y sodificación. El autor desarrolló un conjunto de ecuaciones que calculan los balances de agua y sales en el suelo superficial, incluyendo los efectos del agua freática, riego y cobertura del suelo. Finalmente el autor destaca la importancia del uso de modelos matemáticos en el futuro puesto que se incrementará el uso de aguas de riego de baja calidad, incluyendo aguas residuales con un tratamiento preliminar, el mal manejo del drenaje en los suelos y los fluctuantes niveles freáticos del mismo.

Cerrando esta sección, concluimos que los procesos de salinización y sodificación tienen origen tanto natural (geología del territorio) como antropicos (mal manejo del riego y drenaje agrícola, uso indiscriminado de agroquímicos, deforestación, cambios abruptos del uso del suelos, entre otros) y afectan considerablemente la producción agropecuaria. Sin embargo, el uso de herramientas de monitoreo como los sistemas de información geográfico y los modelos matemáticos permiten la toma de decisiones para la implementación de tecnologías eficiente de drenaje, aplicación de enmiendas y láminas de lavados, conservación del entorno, aspectos claves para garantizar la seguridad alimentaria y disponibilidad del recurso hídrico y el recurso suelo.

1 Sistema de apoyo a las decisiones de evaluación de la tierra (MicroLEIS-DSS) para la protección del suelo agrícola.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Identificar los niveles de vulnerabilidad del suelo a los procesos de sodicidad, por medio de un modelo de Análisis Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica en el Distrito de Riego RUT (Valle del Cauca)

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los parámetros de vulnerabilidad asociados a los procesos de sodicidad por medio de un análisis multicriterio.
- Asignar los grados de importancia a los parámetros de vulnerabilidad por medio de la técnica de Análisis Multicriterio Jerárquico (AHP).
- Delimitar zonas con bajo, mediano y alto riesgo de vulnerabilidad a sodificación en área de estudio, por medio de un Análisis Espacial Multicriterio (AEM)

5. METODOLOGÍA

5.1. ENFOQUE GENERAL DEL ESTUDIO

El enfoque metodológico general del estudio está asociado a la gestión del riesgo (ley 1523 de 2012) y a la Política para la gestión sostenible del suelo (MADS, 2016). De esta manera se integraron herramientas tecnológicas tales como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), análisis multicriterio, evaluación Multicriterio (EMC), para realizar un análisis espacial de los elementos del riesgo, es decir, amenaza y vulnerabilidad. A continuación, se describen las seis etapas metodológicas generales del proceso.

5.2. IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE VULNERABILIDAD

Se realizó una revisión de literatura para identificar los parámetros biofísicos, ambientales y antrópicos asociados a los procesos de sodicidad, generando un primer listado de parámetros asociados a este proceso.

Posteriormente se conformó un panel de expertos para validar el listado surgido de la revisión de literatura. Esta fase definió los parámetros de vulnerabilidad. Los expertos participantes cumplieron las siguientes condiciones:

- Profesionales en áreas de suelos y afines
- Tienen en su mayoría estudios de posgrado
- Profesionales del Valle del Cauca y de otros departamentos del país.

5.3. CATEGORIZACIÓN Y NORMALIZACIÓN

La construcción de las categorías o rangos se realizó mediante la consulta de literatura. Cada factor de vulnerabilidad se dividió en categorías o rangos de acuerdo con su relación con la misma a los procesos de sodicidad del suelo. En este sentido, los valores

cercanos a 1 fueron asignados a los parámetros que hacen más favorables a la vulnerabilidad de la sodicidad del suelo, caso contrario, los valores cercanos a 0 fueron asignados a aquellas categorías o rangos de un parámetro que representan menor vulnerabilidad.

5.4. ASIGNACIÓN DE PESOS O GRADOS IMPORTANCIA

Una vez definidos los parámetros de vulnerabilidad, se realizó un proceso para asignar pesos o valores de importancia a cada uno. El método usado fue el Análisis Jerárquico de Procesos o AHP por sus siglas en inglés (Saaty, 1994). Se consultaron expertos para cada caso y se pidió realizar una comparación pareada. La escala de valoración se presenta a continuación en la Tabla 5.

Tabla 8. Escala de valores para comparación pareada de los parámetros identificados.

Escala numérica	Definición
1	Igual importancia de un elemento sobre el otro
3	Moderada importancia de un elemento sobre el otro
5	Fuerte importancia de un elemento sobre el otro
7	Muy fuerte importancia de un elemento sobre el otro
9	Extrema importancia de un elemento sobre el otro

Fuente: (Saaty, 1994)

En el caso en que el factor en evaluación fue de menor importancia que el factor con el cual se estaba comparando, la calificación se realizó con fracciones desde 1/2 hasta 1/9. Para validar los pesos obtenidos y la calificación grupal se calculó la Razón de Consistencia (RC) (Jaiswal et al., 2015).

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

Ec. 1

Donde,

IA: Índice de Aleatoriedad, el cual viene definido por el número de factores en el análisis (Jaiswal et al., 2015).

IC: Índice de consistencia

$$IC = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad Ec. 2$$

Donde,

n: número de parámetros en análisis

λ : Promedio de cocientes

Normalmente se considera que Valores de RC menores a 0.1 son aceptados como indicador de alta consistencia en evaluaciones grupales e individuales. En esta evaluación se decidió aceptar hasta 0.2 en las valoraciones individuales y hasta 0.1 en la grupal.

Se realizó invitación a veinte personas consideradas expertas o asociadas por su experiencia y formación profesional a la temática en estudio. Entre los invitados se incluyeron profesionales con postgrado de diferentes instituciones del estado y sector privado, como la Universidad del Valle, Universidad Nacional de Colombia (sede Palmira) entre otras. La invitación se realizó vía correo electrónico institucional. La consulta fue respondida por 13 expertos (20 invitados). En la Tabla 6 se presentan los nombres e instituciones de los expertos que respondieron la consulta.

Tabla 9. Participantes del panel de expertos

Nombre	Institución	Nivel postgrado
Armando Torrente	USCO	PhD.
Andrés Echeverri	Universidad del Valle	PhD.

Leonardo Castillo	ASORUT	MSc.
Carlos José López	FumyRiegos	MSc
Clever Becerra	AGROSAVIA	MSc
Edwin Erazo	Universidad del Valle	MSc; Est Doctorado
Martha Daza	Universidad del Valle	PhD.
Aldemar Reyes	Universidad del Valle	PhD.
Gustavo Romero	CVC	Candidato MSc
Claudia Martínez	CVC	MSc
Cristian Pérez	IHE	MSc
Luis Salazar	CENICAFÉ	PhD.
Carlos Escobar Chalarca	UNAL- Palmira	PhD.

5.5. GENERACIÓN DE INDICE DE VULNERABILIDAD DE LOS SUELOS A LA SODICIDAD

Finalmente se generaron los mapas de distribución espacial de los parámetros de vulnerabilidad, el cual se llevó a cabo con diferentes metodologías. En algunos casos se usaron capas vectoriales y se recategorizaron, en otros casos se obtuvieron derivados de capas raster como modelos digitales de elevación y en varios casos se realizaron interpolaciones a partir de datos de suelos (muestreos). Para el mapa de índice de vulnerabilidad de los suelos a la sodicidad. Los pasos seguidos fueron los siguientes:

- Los mapas vectoriales y raster de los parámetros fueron convertidos a raster usando los valores normalizados, es decir, valores de 0 a 1.
- Mediante el uso de la calculadora raster del software ArcGIS se aplicó la expresión general para calcular el índice.

$$IVSSod = \sum_i^n W_j \times P_i$$

Donde:

IVSSod: Índice de Vulnerabilidad del suelo a la sodicidad

Wj: Peso del parámetro i

Pi: Valor normalizado del parámetro i en el área mínima de análisis.

5.6. DEFINICIÓN DE ZONAS HOMOGÉNEAS

Mediante la aplicación de la herramienta Reclassify del software ArcGIS se realiza la clasificación de los rangos, donde se definen los valores referentes a la vulnerabilidad del suelo frente a la sodicidad, expuestos a continuación:

- $IVSSod < 0,2$ Vulnerabilidad Muy Baja
- $IVSSod$ entre 0,2 y 0,4 Vulnerabilidad Baja
- $IVSSod$ entre 0,4 y 0,6 Vulnerabilidad Media
- $IVSSod$ entre 0,6 y 0,8 Vulnerabilidad Alta
- $IVSSod$ entre 0,8 y 1 Vulnerabilidad Muy Alta

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. PARAMETROS IDENTIFICADOS

Según la revisión de literatura se encontraron los siguientes parámetros, los cuales fueron evaluados y comparados con el panel de expertos seleccionados, dando como resultado final los siguientes parámetros más relevantes frente a la vulnerabilidad del suelo con respecto a la sodicidad.

- Prácticas de riego
- Mineralogía de arcillas
- Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo soluble (Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo)
- Prácticas de fertilización
- pH
- Contenido de materia orgánica
- Capacidad de Intercambio Catiónico CIC

6.2. CATEGORIZACIÓN Y NORMALIZACIÓN

En la Tabla 7 se presentan las categorías y los valores normalizados de cada parámetro de vulnerabilidad considerado. En la Figura 10 se presenta la distribución espacial de la vulnerabilidad de los suelos del RUT a la sodicidad.

Tabla 10. Categorías y valores normalizados de los parámetros identificados.

PARÁMETRO	CATEGORÍAS	VALOR NORMALIZADO
Prácticas de riego (En este caso se ha considerado la eficiencia de aplicación)	Baja eficiencia (riego por surco o gravedad)	0,75
	Mediana Eficiencia (riego por aspersión)	0,5
	Alta Eficiencia (riego por goteo y microaspersión)	0,25
	Sin riego	0

Mineralogía de arcillas (Se refiere al tipo de arcilla dominante)	Ilita, Caolinita	0,25
	Montmorillonita (1:1)	0,5
	Vermiculita (2:1)	0,75
Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo (dS/m)	<1,2	0,8
	1,2 – 2	0,6
	2 – 4	0,4
	4 – 8	0,2
	>8	0
Prácticas de fertilización	Muy Inadecuadas	1
	Inadecuadas	0,8
	Medianamente adecuadas	0,6
	Adecuadas	0,4
	Muy adecuadas	0,2
pH	<5	0
	5 – 6,5	0,1
	6,5 – 7	0,3
	7 - 8,5	0,5
	>8,5	1
Materia Orgánica presente en el suelo (%)	<1,5	0,75
	1,5 – 3	0,5
	>3	0,25
Capacidad de Intercambio Catiónico CIC (meq/100g)	<15	0.25
	15 - 30	0.5
	30 - 40	0.6
	40 – 80	0.75
	80 - 100	1

6.3. PESOS DE PARÁMETROS DE VULNERABILIDAD

Los pesos asignados por cada experto consultado y los pesos finales seleccionados por el panel de expertos se presentan en las Tablas 8 y 9, respectivamente.

Tabla 11. Peso por parámetro, evaluado individualmente por cada experto.

PARAMETRO	Mineralogía de arcillas	CIC	% M.O.	CE en fase soluble	pH	Prácticas de fertilización	Prácticas de riego
Andrés Echeverri	0,3	0,1	0,25	0,2	0,05	0,05	0,05
Armando Torrente	0,3	0,1	0	0,2	0,2	0,1	0,1
Carlos José López	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2
Edwin Erazo	0,1	0,1	0,15	0,05	0,1	0,2	0,3
Luis Salazar	0,2	0,05	0,02	0,25	0,35	0,05	0,08
Martha Daza	0,1	0,05	0,1	0,2	0,2	0,05	0,3
Aldemar Reyes	0,1	0	0	0,2	0,2	0,2	0,3
Cleber Becerra	0,2	0,3	0,05	0,2	0,05	0,05	0,15
Leonardo Sánchez	0	0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3
Cristian Pérez	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2
Gustavo Romero	0,3	0,05	0,05	0,15	0,05	0,2	0,2
Claudia Martínez	0,3	0,07	0,05	0,13	0,05	0,2	0,2
Carlos A. Escobar	0,25	0,1	0,3	0,2	0,05	0,05	0,05

Tabla 12. Resultados de pesos grupales finales seleccionados por el panel de expertos.

PARÁMETRO DE VULNERABILIDAD	PESO
Mineralogía de arcillas	0,181
Capacidad de Intercambio Catiónico	0,086
Contenido de materia orgánica	0,098
Concentración salina en la fase soluble	0,175
pH	0,131
Prácticas de fertilización	0,142
Prácticas de riego	0,187
TOTAL	1,000

La razón de consistencia (RC) de la matriz grupal fue 3,19%, valor dentro del rango aceptable (menor al 10%) y que significa que la opinión grupal tiene un alto grado de consistencia.

Según los resultados obtenidos los expertos consultados dan mayor importancia a las Prácticas de riego, Mineralogía de las arcillas y la Concentración de sales en la fase soluble del suelo. En un segundo grupo de importancia se encuentran parámetros como las Prácticas de fertilización y el pH. Los parámetros de menor importancia para este grupo de expertos fueron: Contenido de materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico.

6.4. INDICE DE VULNERABILIDAD DE SODICIDAD DE SUELOS

De acuerdo con los pesos obtenidos (ver tabla 9), la ecuación del índice se define de la siguiente manera:

$$IVSodS = [0.187PR] + [0.181MAr] + [0.175CEes] + [0.142PF] + [0.131pH] \\ + [0.098m.o.] + [0.086CIC]$$

Donde,

IVSSod: Índice de vulnerabilidad de los suelos a la sodicidad

PR: Prácticas de riego

MAr: Mineralogía de Arcillas

CEes: Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo

PF: Prácticas de Fertilización

pH: pH del suelo

m.o.: Contenido de materia orgánica

CIC: Capacidad de Intercambio Cationico.

6.5. MAPAS DE PARÁMETROS DE VULNERABILIDAD

Se identificaron siete parámetros relacionados a la vulnerabilidad del suelo frente a la sodicidad (ver tabla 7); de los cuales a continuación se desglosan los mapas tipo raster realizados en el software ArcGIS versión 10.8 con los valores normalizados asignados.

A continuación, se presenta cada uno de los resultados obtenidos.

5.5.1 Mapa de método de riego.

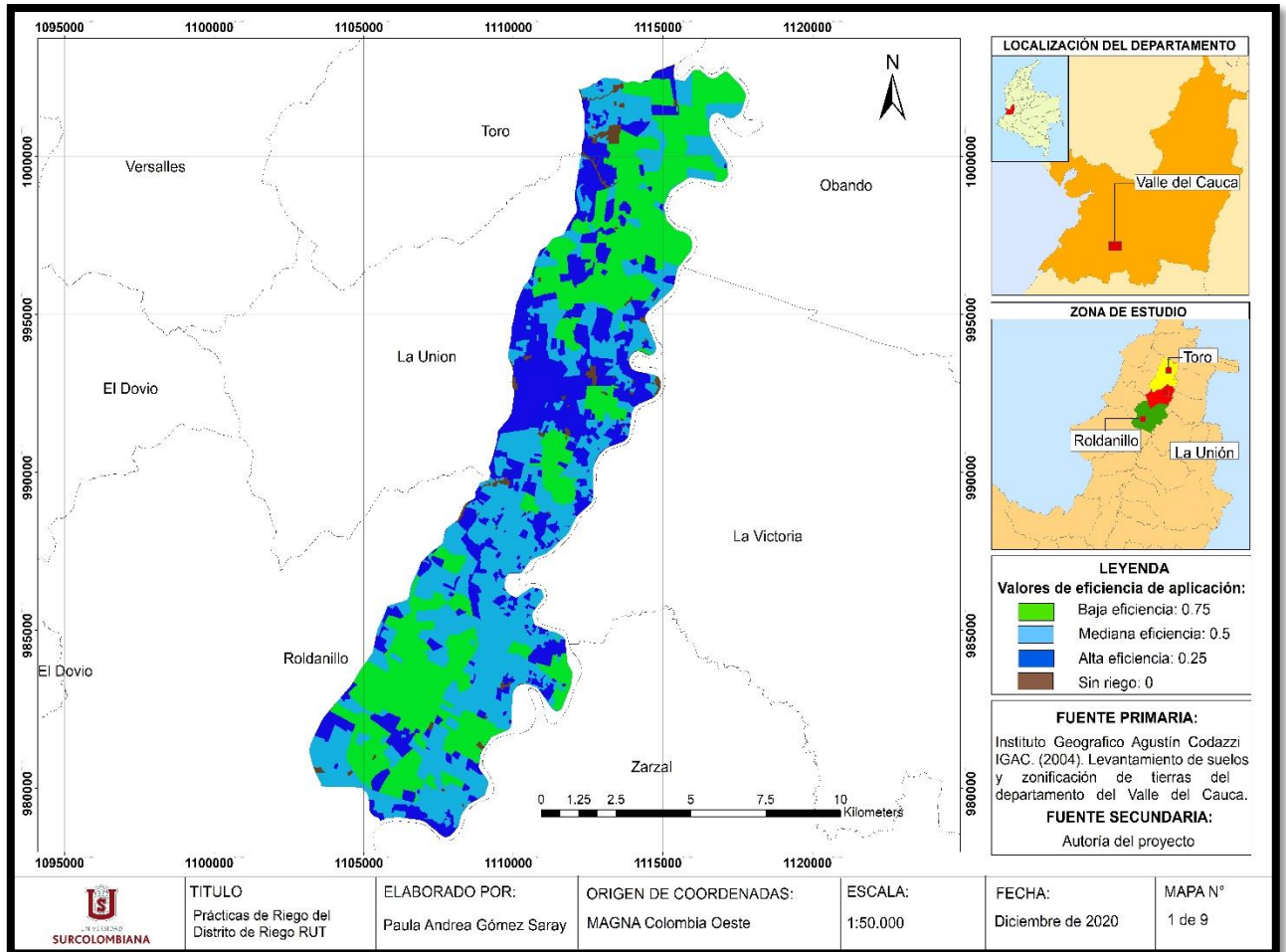


Figura 2. Mapa de criterio de método de riego. Fuente: Autoría del proyecto.

Se obtiene un porcentaje dominante del total del área de estudio de 38.7% en la práctica de riego de mediana eficiencia (aspersión), donde predomina el tipo de suelo Molisol, siendo la Caolinita la mineralogía de arcilla presente y con disponibilidad de siembra de cultivos de algodón, soya, sorgo o caña de azúcar. Con un 35.6% ocupando el segundo porcentaje del área total, se encuentra la práctica de riego de baja eficiencia (por superficie), la cual se identifica por suelos vertisoles, siendo la Montmorillonita, la

mineralogía protagonista, con disponibilidad de cultivos tales como caña de azúcar o arroz. En siguiente lugar se encuentra la práctica de riego de alta eficiencia (goteo o microaspersión), con un porcentaje del 1.6%, predominando suelos Inceptisol y Alfisoles, siendo la Caolinita la mineralogía existente y predominante en este tipo de suelos, con una disponibilidad de cultivos, como soya, ajonjolí, frijol, maní, patilla, melón u hortalizas. En el menor porcentaje, se encuentra las zonas donde no se aplica ningún tipo de práctica de riego (sin riego), siendo un valor del 1.6% de la totalidad del área de estudio.

5.5.2 Mineralogía de arcillas.

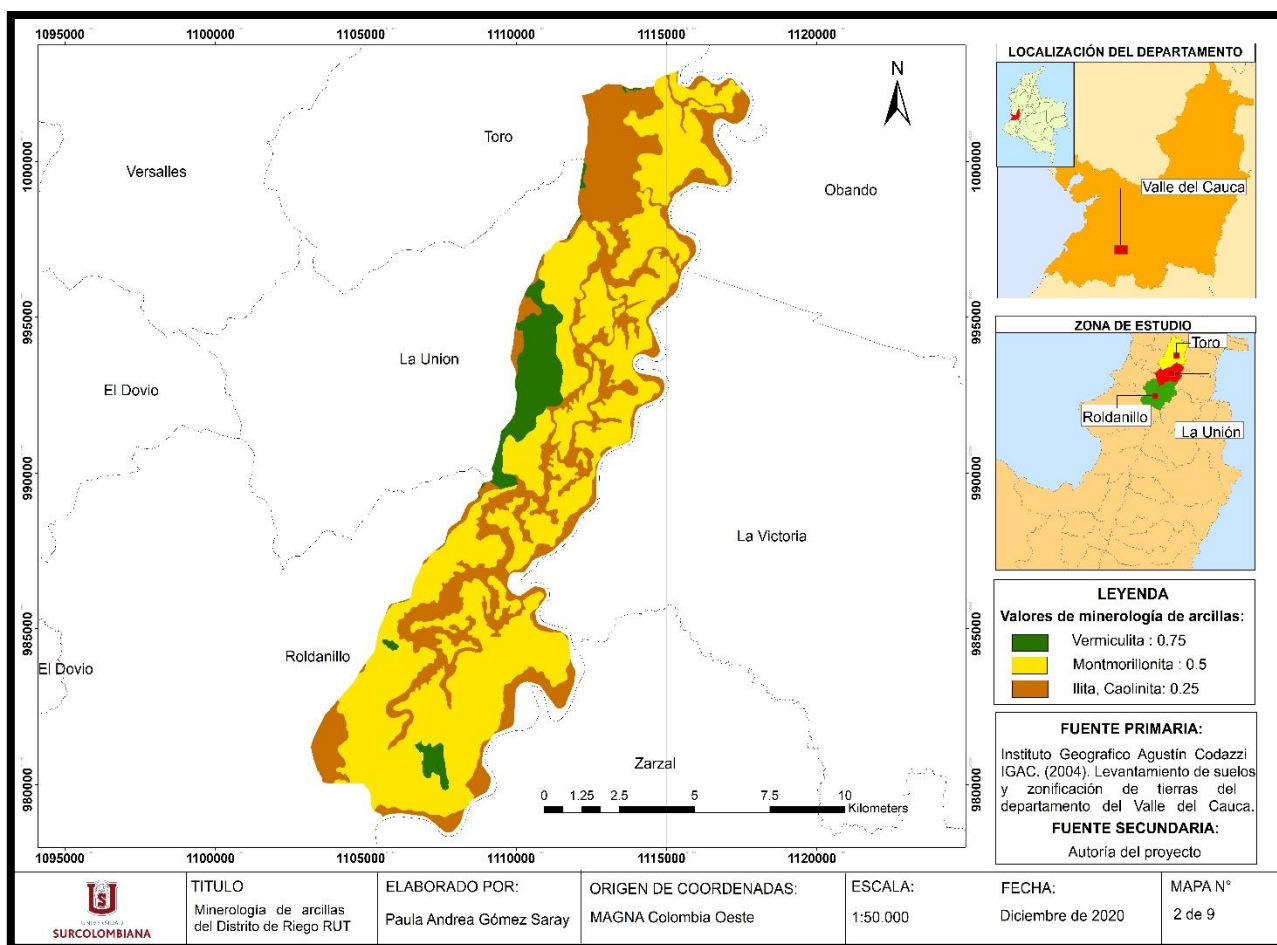


Figura 3. Mapa de criterio de mineralogía de arcillas. Fuente: Autoría del proyecto.

Se obtiene una predominancia en la Montmorillonita como mineralogía de arcillas, con un porcentaje del 60.5% de la totalidad del área de estudio, representado por el tipo de

suelo Vertisol, seguido por la Caolinita con un 32.9%, predominando los suelos Inceptisoles y Molisoles, con el menor porcentaje de incidencia se encuentra la Vermiculita con un 6.6%, con un suelo Vertisol, siendo este último el tipo de suelo más representativo y con mayor incidencia en la zona de estudio.

5.5.3 Mapa de Conductividad Eléctrica (CE)

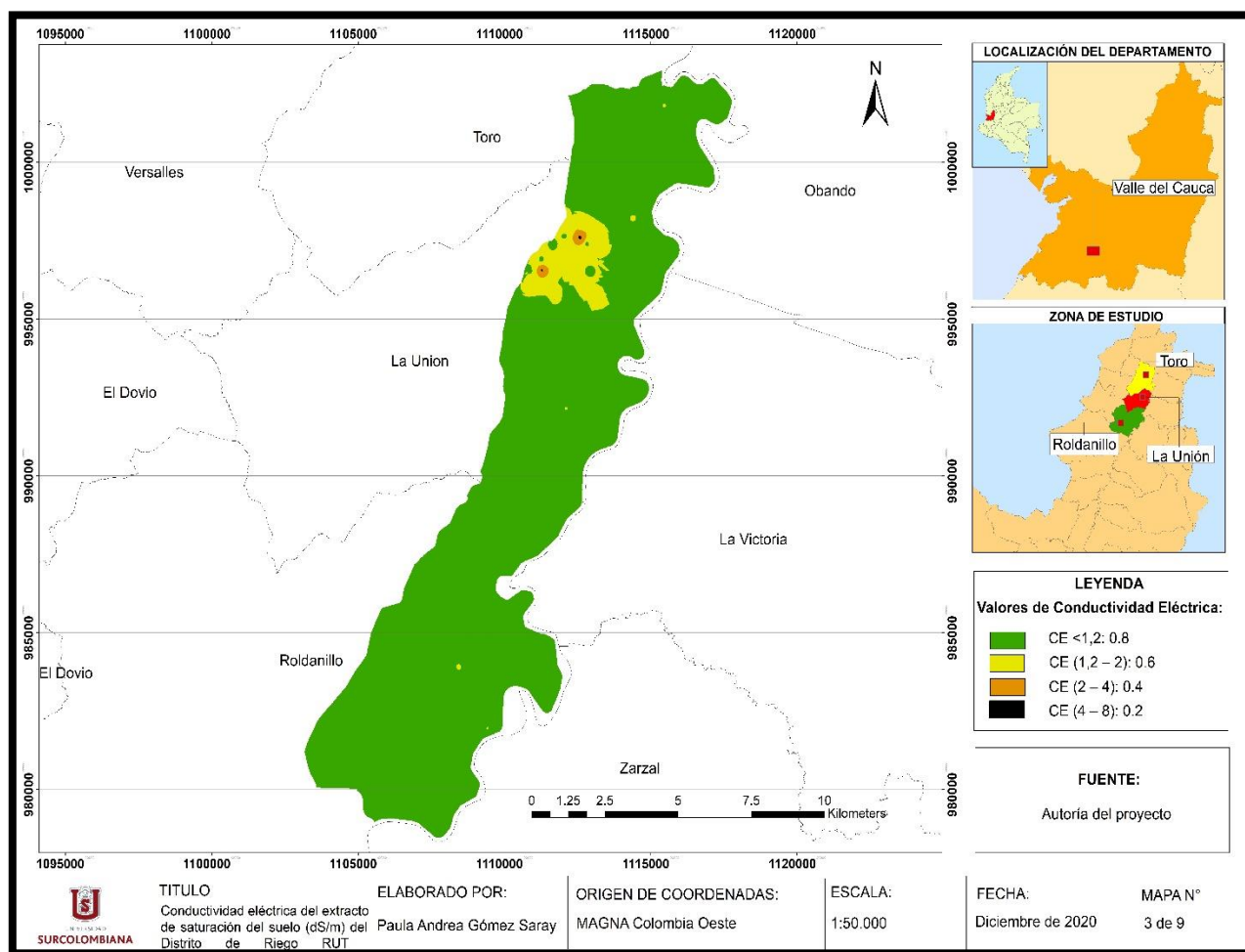


Figura 4. Mapa de criterio de Conductividad Eléctrica. Fuente: Autoría del proyecto.

La zona de estudio cuenta con un porcentaje bajo de conductividad eléctrica, ya que se obtuvo el 91,2% de valores menores a 1.2 (dS/m) seguido por 6.2% entre 1.2 – 2 (dS/m), 0.9% entre 2 - 4 (dS/m) y con un 1.8% de valores superiores de CE de 4 – 8 (dS/m). Según el análisis de suelos, el cultivo predominante en esta zona es la caña de azúcar y el maíz. Al contar con un 91,2% de la zona de estudio con valores menores a 1.2 (dS/m), cuenta con un

valor normalizado de 0.8, lo cual lo hace cercano a 1, siendo propenso a ser vulnerable frente a un suelo sódico.

5.5.4 Mapa de Prácticas de Fertilización.

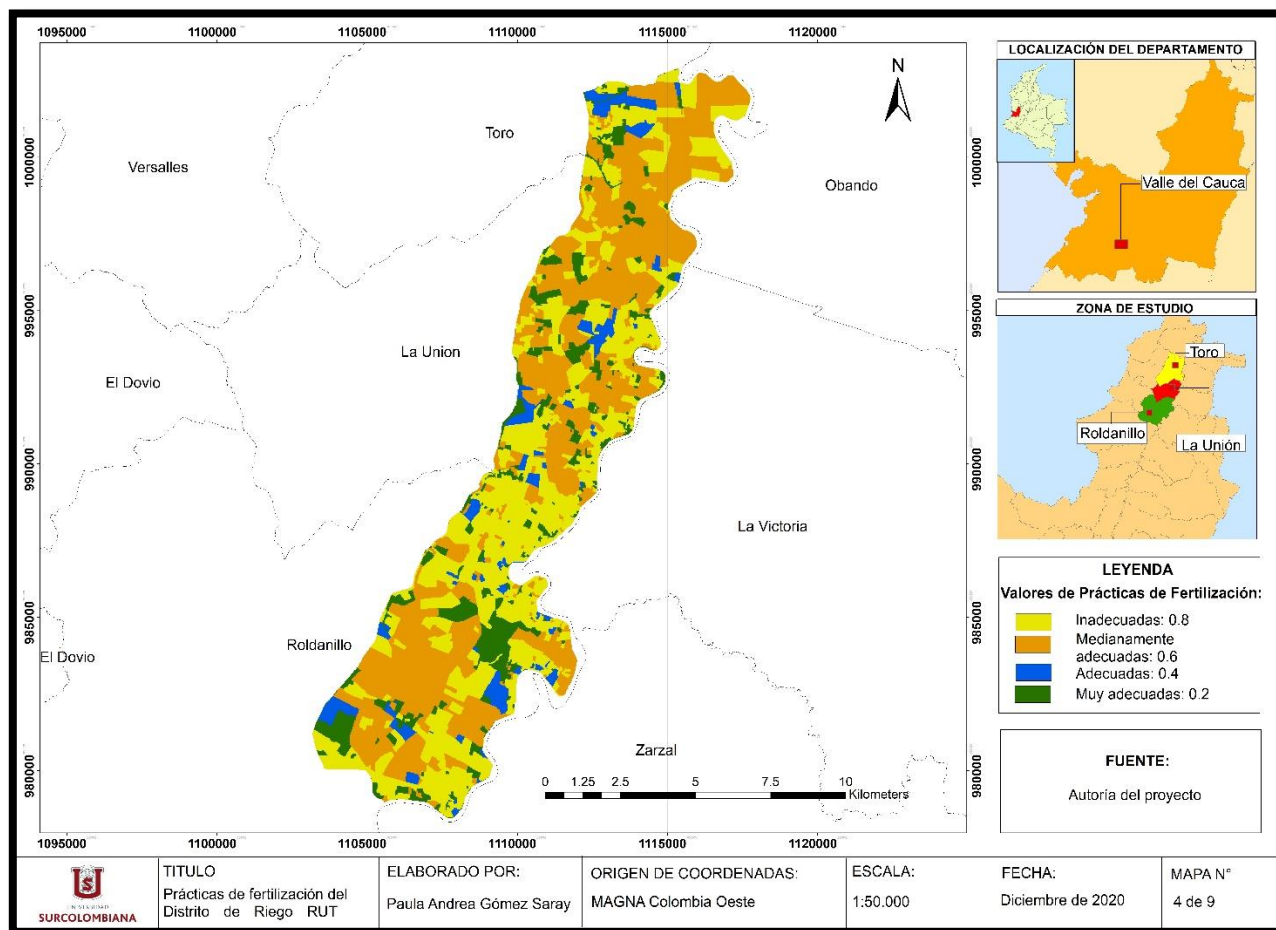


Figura 5. Mapa de criterio de Prácticas de Fertilización. Fuente: Autoría del proyecto.

Los resultados obtenidos muestran que hay un porcentaje predominante del 45.1% de prácticas medianamente adecuadas, en la zona de estudio, seguido por el 38.3% en prácticas de fertilización inadecuadas, el 11% corresponde a prácticas muy adecuadas y el 5.6% a prácticas adecuadas de fertilización. Esto nos lleva a un porcentaje del 83.4% donde el suelo puede estar sujeto a ser vulnerable a la sodicidad.

5.5.5 Mapa de pH.

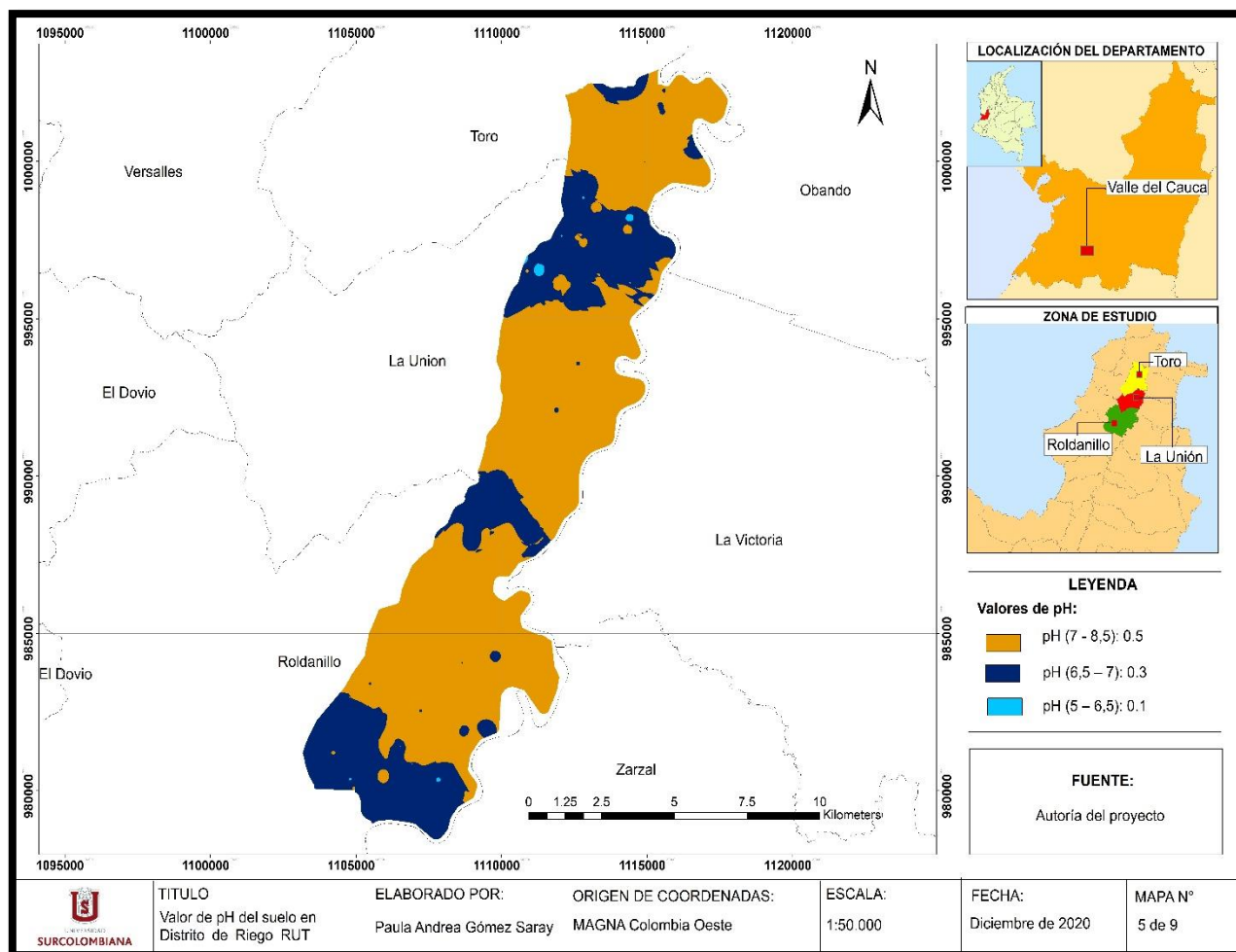


Figura 6. Mapa de criterio de pH. Fuente: Autoría del proyecto.

El pH predominante en la zona de estudio se encuentra en el rango neutro hasta ligeramente alcalino (7 – 8.5), con un porcentaje de 54% del área total, seguido por 24.8% con un pH entre 6.5 - 7, 20.4% del rango 5 – 6.5 y para valores superiores a 8.5, se obtuvo un 0.9%, para un total del 100% estudiado. Según Molina (2018) la categoría de suelo sódico, son de pH superior a 8,2 - 8,5 que, además, no son salinos y cifras superiores a 8,5 puede indicar problemas graves de sodicidad. A partir de pH 8.5 el suelo comienza a considerarse "alcalino" que es un estado extremo de reacción básica (Orús et al., 2011). Esto nos da razón a los resultados obtenidos, ya que el mayor porcentaje de la zona de

estudio cuenta con valores oscilantes entre (7 – 8.5), valores a favor de la vulnerabilidad del suelo a ser sódico.

El cultivo predominante en el pH ácido hasta neutro, fue la caña de azúcar, ya para valores alcalinos, fueron los pastos.

5.5.6 Mapa de contenido de Materia Orgánica.

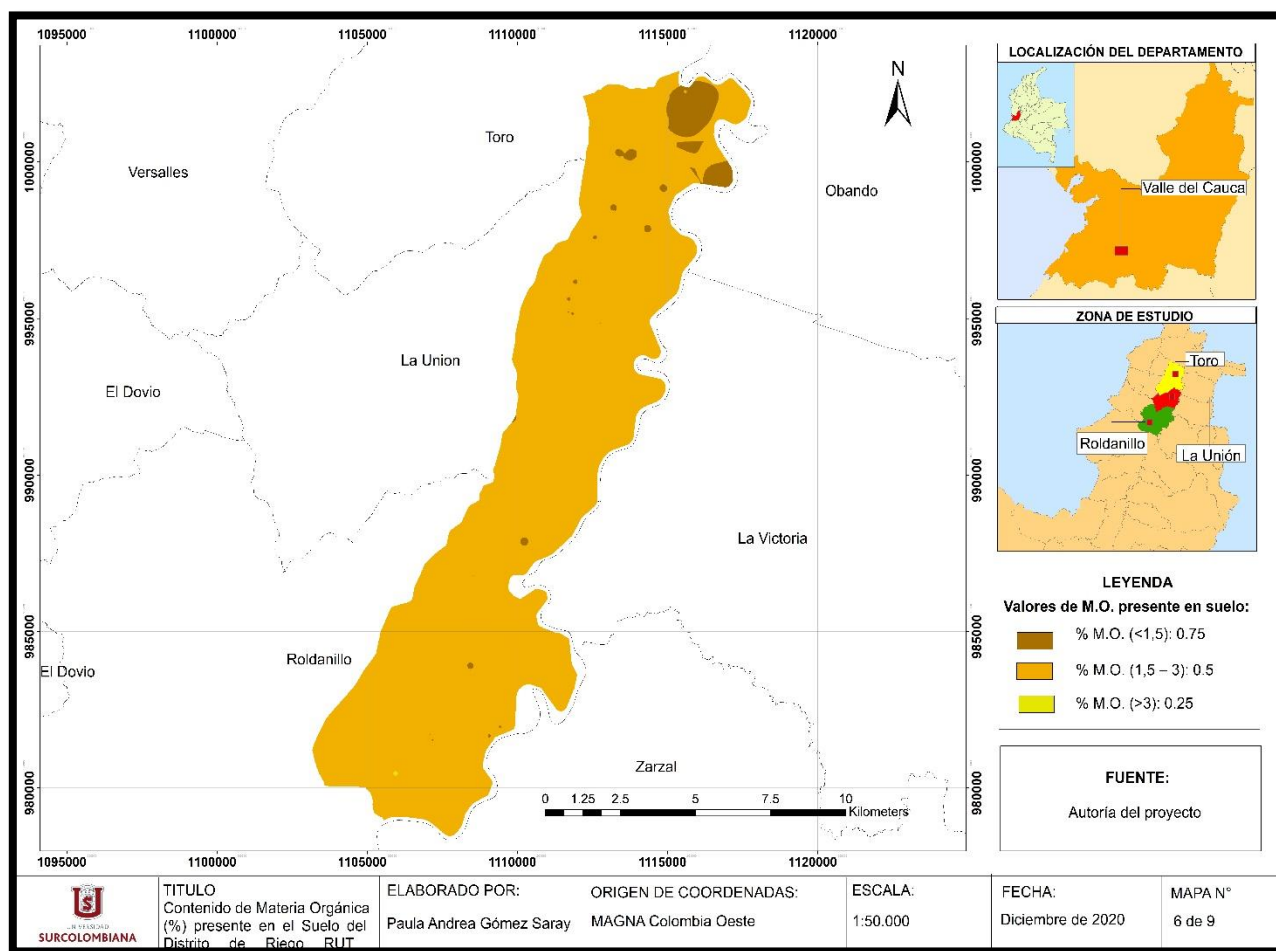


Figura 7. Mapa de criterio de contenido de Materia Orgánica. Fuente: Autoría del proyecto.

La zona de estudio cuenta con suelos de un porcentaje de materia orgánica dentro del rango de 1.5 a 3%, predominando con el 64.6% de la totalidad de la zona, seguido por el 31% en suelos carentes de materia orgánica con valores menores al 1.5%, y el 4.4% en suelos con alto contenido de materia orgánica, mayores al 3%. El contenido de la materia orgánica del suelo tiende a ser un indicador de fertilidad, ya que permite la actividad

microbiana que lleva a cabo para la descomposición de los residuos orgánicos incorporados en el suelo, su humificación y mineralización. Así mismo, según Barral (1997) el uso del suelo también determina el contenido de MO, ya que condiciona la cantidad y composición de la materia orgánica que se incorpora, esto nos lleva a dar énfasis en el porcentaje de 31% donde la cantidad de MO es mínima, siendo zonas donde predominan cultivos intensivos como la caña de azúcar.

5.5.7 Mapa de Capacidad de Intercambio Catiónico

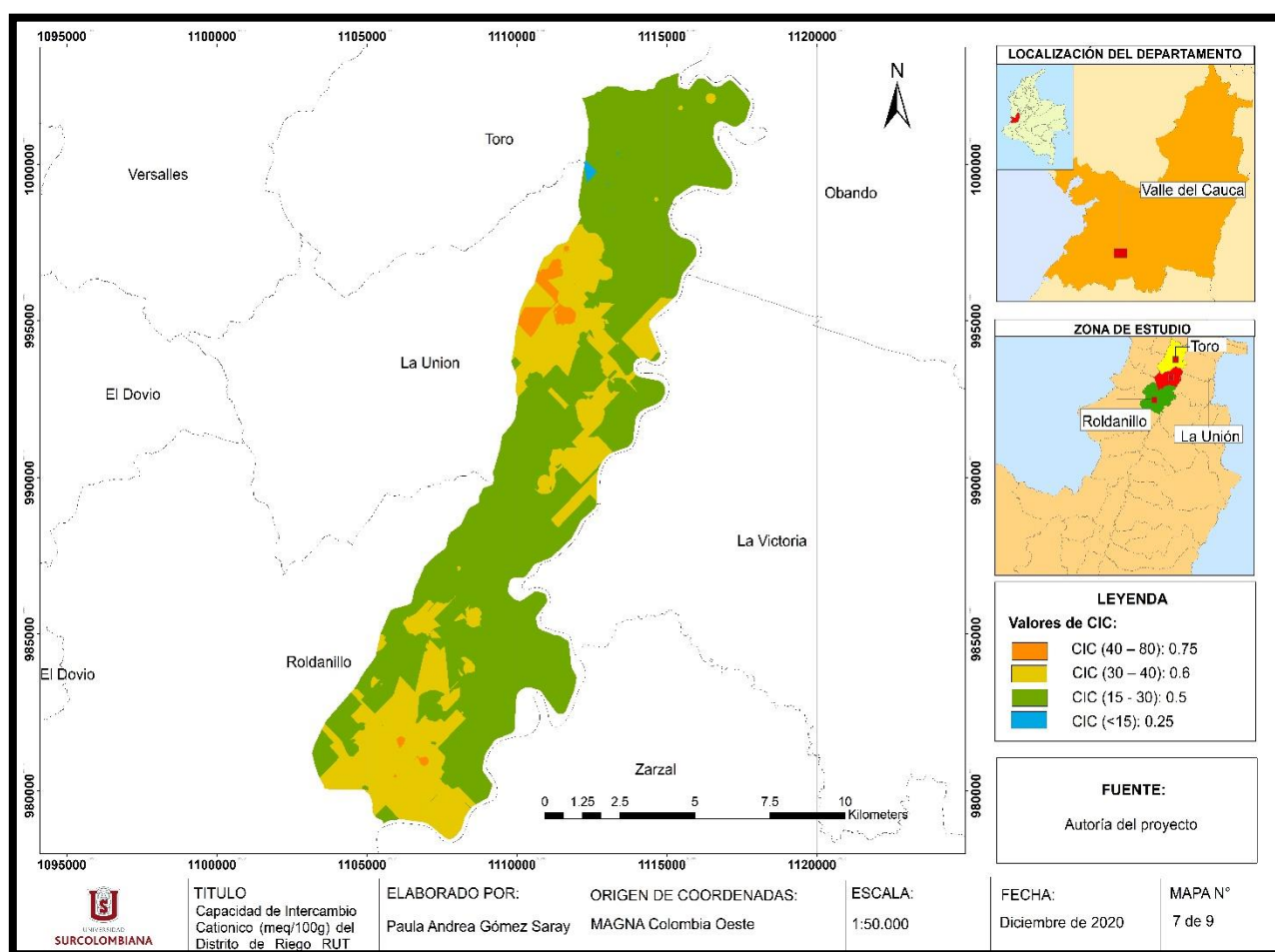


Figura 8. Mapa de criterio de Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC). Fuente: Autoría del proyecto.

Se obtiene un porcentaje del 51.3% del total de la zona de estudio, con una escala del CIC (15 a 30) meq/100g de suelo, seguido por el 32.7% de un CIC (30 A 40) meq/100g de suelo, seguido por 10.6% de CIC (40 a 80) meq/100g de suelo y por último un 5.3% de

CIC (<15) meq/100g. Según Graziano (2012), el nivel de CIC indica la habilidad de suelos a retener cationes, disponibilidad y cantidad de nutrientes a la planta, su pH potencial entre otras. Un suelo con bajo CIC indica baja habilidad de retener nutrientes, arenoso o pobre en materia orgánica. Según estos resultados ilustrados la zona de estudio cuenta con un CIC relativamente bajo, relacionando los resultados del mapa de contenido de materia orgánica, donde predominan valores menores del 1.5% hasta el 3% de contenido de M.O. en el suelo, convirtiéndolo en condiciones favorables para la vulnerabilidad sódica.

6.6. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL IVSSod

Mediante el uso de la calculadora raster del software ArcGIS se aplicó la expresión general para calcular el índice de vulnerabilidad de los suelos a la sodicidad (IVSSod). A continuación, se muestra el mapa del IVSSod aun sin hacer uso de la herramienta reclassify:

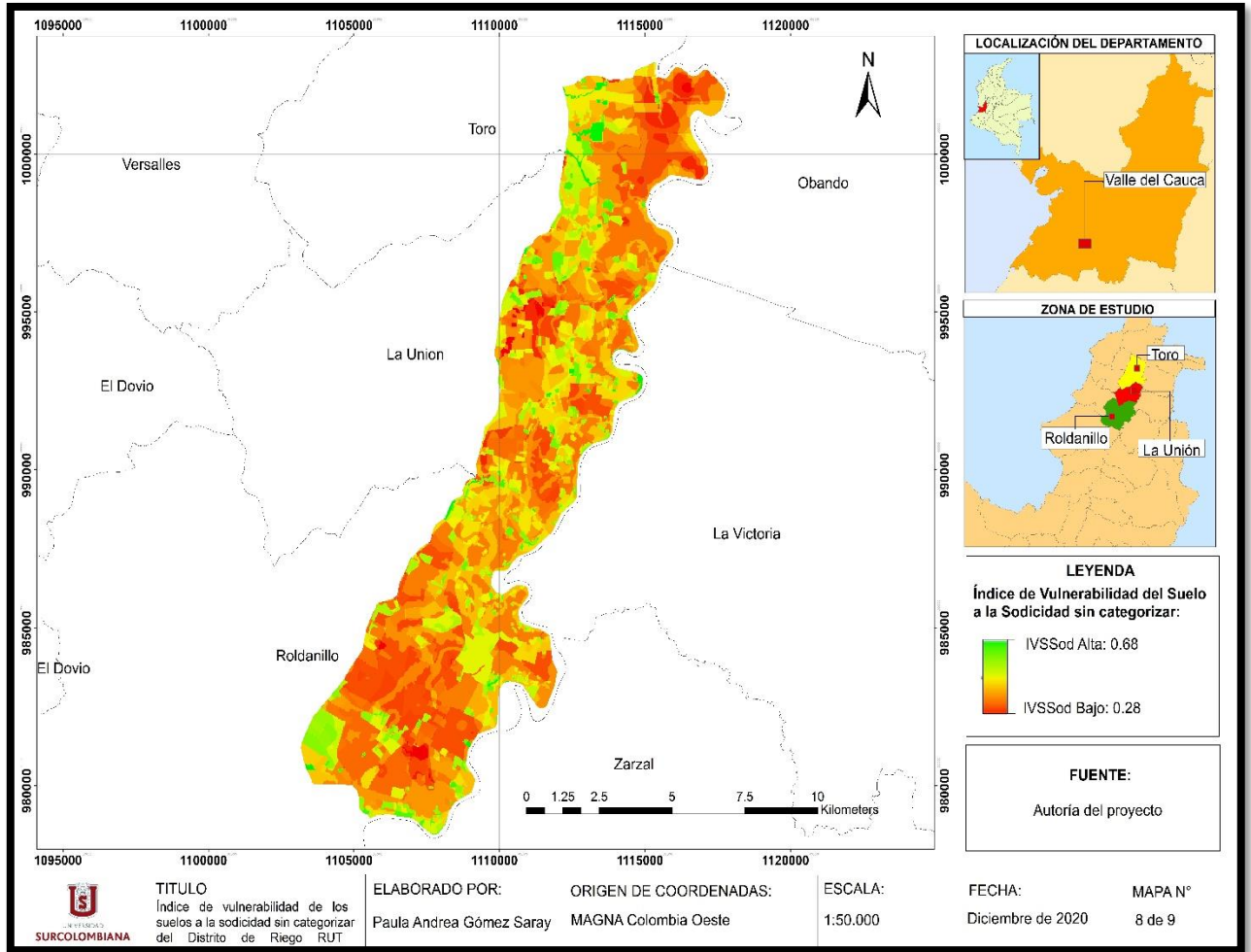


Figura 9. Mapa del Índice de vulnerabilidad de los suelos a la sodicidad (IVSSod) sin categorizar.

En la figura 9 puede apreciarse que los valores fluctúan dentro de un rango de 0.28 a 0.68, este se encuentra en una variación entre vulnerabilidad baja hasta alta, sin llegar a ser muy alta.

6.7. ZONAS HOMOGÉNEAS

Una vez obtenido el mapa raster del IVSSod, se aplicará la herramienta Reclassify del software ArcGIS para obtener las zonas homogéneas de vulnerabilidad. A continuación, se presenta el mapa final donde se identifica cada una de las categorías de vulnerabilidad del suelo en la zona de estudio.

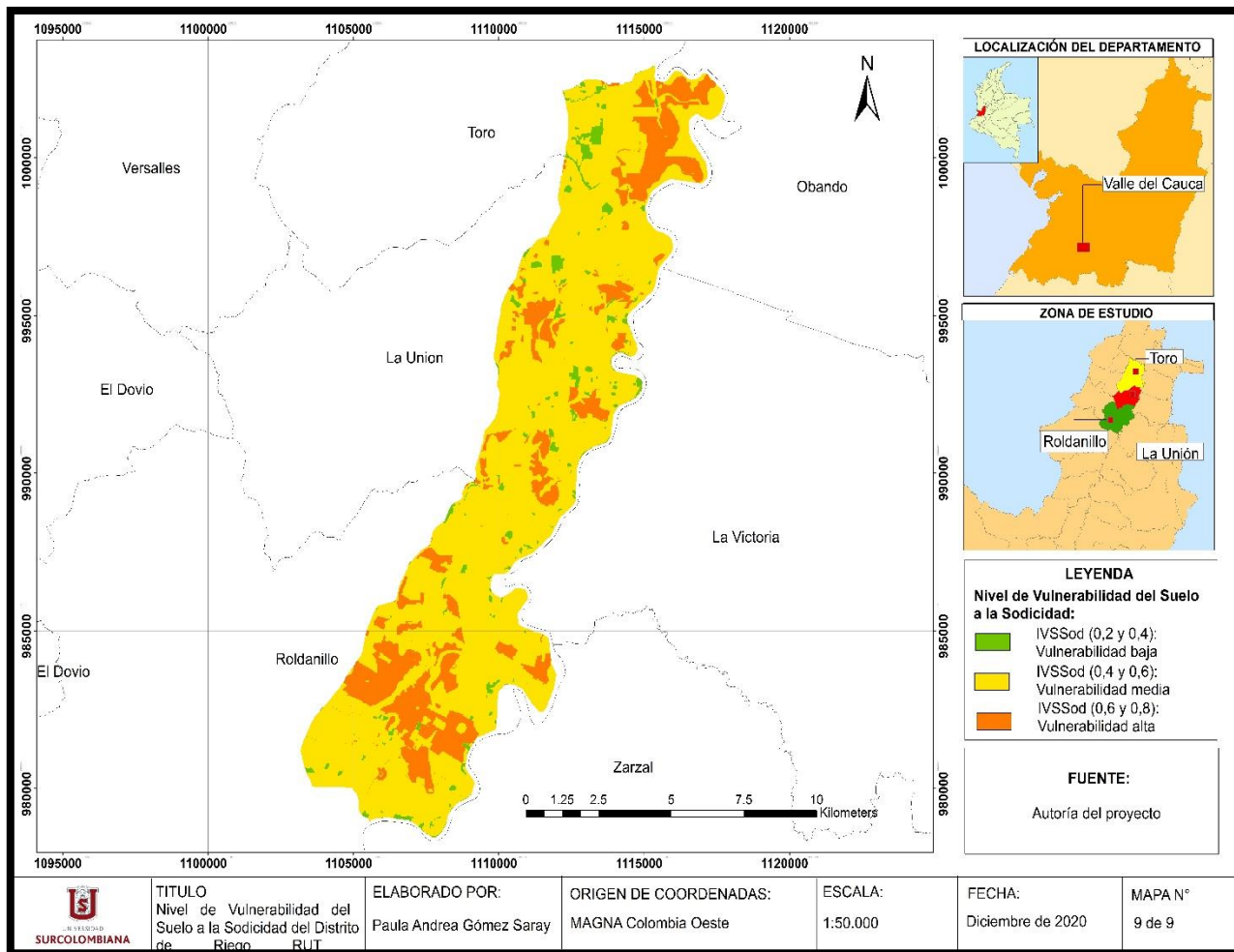


Figura 10. Mapa del Nivel de vulnerabilidad de los suelos a la sodicidad respecto al (IVSSod) en zonas homogéneas.

De lo anterior se identifica como color Verde 0.2 a 0.4 Vulnerabilidad Baja, amarillo de 0.4 a 0.6 Vulnerabilidad Media y naranja 0.6 a 0.8 Vulnerabilidad Alta.

Se identifica que el 78.1% del área, tiene vulnerabilidad Media a la sodicidad de suelos. Se identificaron zonas con vulnerabilidad Alta (18.8% del área) y el 3% identificado como una zona con vulnerabilidad baja. Las zonas con vulnerabilidad Alta coinciden con suelos tipo Vertisoles, dominados por arcillas tipo 1:1 (Montmorillonita) y en el centro occidente por 2:1 (Vermiculita), donde las prácticas de riego son de baja eficiencia, con zonas de baja concentración de sales en fase soluble. Así mismo, dentro del segundo grupo de parámetros de importancia e incidencia en a la vulnerabilidad del suelo, se logra identificar que las prácticas de fertilización inadecuadas y medianamente adecuadas

repercutan sobre la zona de vulnerabilidad alta, con pH de valores oscilantes entre (7 a 8.5) predominantes en la zona de estudio.

5.7.1 Análisis espacial

La zona de alta vulnerabilidad se dividió en tres partes principales, denominadas como zona 1 ubicada en la parte norte del mapa, zona 2 como centro y zona 3 en la parte sur de la zona de estudio. A continuación, se realizó una relación de los parámetros con cada una de las zonas, identificando que incidencias tienen sobre cada una, en la vulnerabilidad del suelo frente a la sodicidad.

Tabla 13. Relación de parámetros con zonas de alta vulnerabilidad.

Parámetro Zona de vulnerabilidad	Método de Riego	Mineralogía de arcillas	CE	Prácticas de fertilización	pH	Materia Orgánica	CIC
Zona 1 Norte	Baja eficiencia	Montmorillonita	<1,2	Medianamente adecuadas	7 - 8.5	No hay incidencia	15-30
Zona 2 Centro	Baja eficiencia / Mediana etc.	Montmorillonita / Vermiculita	<1,2	Inadecuadas / Medianamente A	7 - 8.5	1.5 - 3%	No hay incidencia
Zona 3 Sur	Baja eficiencia	Montmorillonita	<1,2	Medianamente adecuadas	7 - 8.5	1.5 - 3%	No hay incidencia

- Zona 1 Norte

En esta primera zona, según la tabla 11, se puede identificar cuatro parámetros principales que inciden sobre esta zona de vulnerabilidad. El método de riego de baja eficiencia (riego por surco o gravedad), estas prácticas traen como consecuencias en el suelo de encharcamiento y problemas de erosión ya que el agua no es aprovechada por el suelo de manera uniforme. Otro factor predominante es la mineralogía de arcillas, donde se identifican el tipo Montmorillonita, la cual se caracteriza por su alta plasticidad y poca permeabilidad, esto trae consigo el taponado de los poros del suelo, suele provocar un sellado superficial del suelo que reduce la infiltración y provoca anegamiento superficial. (Pla, 2014). La relación entre la sodicidad y la mineralogía de arcillas está en las

propiedades físicas del suelo, especialmente las relacionadas con la velocidad de infiltración y la conductividad hidráulica (Pla, 2014).

Como tercer factor incidente en la zona norte de vulnerabilidad se encuentra la Concentración salina en la fase soluble (Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo), a pesar de tener un CE menor al 1.2 (dS/m), abarca la zona de alta vulnerabilidad norte. Como último factor predominante dentro de esta zona se encuentra el pH, con un valor de 7 a 8.5, según Molina (2018) la categoría de suelo sódico, son de pH superior a 8,2 - 8,5 que, además, no son salinos. Esto se debe a que el extracto de saturación, la suma de carbonatos más bicarbonatos es mayor que 1,5 meq/l. la clave de la alcalinidad (radica en la composición aniónica de la solución, que en este caso viene también determinada por la composición catiónica; esto es debido a la distinta solubilidad de los carbonatos de Ca y Na, este factor es incidente en las tres zonas de alta vulnerabilidad.

- Zona 2 Centro

En esta segunda zona ubicada en la parte centro, identificamos los mismos factores de la zona anterior (prácticas de riego, mineralogía de arcillas, CE y pH), sumando el de prácticas de fertilización, según Valencia & Rodríguez (2015), los métodos de aplicación del fertilizante en la zona de estudio, se identificaron seis formas diferentes, las cuales fueron según su eficiencia; fertirrigación, fertirrigación manual (aguatero), chorrillo, foliar, voleo y corona. El método de aplicación menor eficiente se encuentra la aplicación en corona y voleo, alcanzando un 81,4% (8972,7ha) del área del total Distrito RUT. Además, en esta zona centro en el parámetro de mineralogía de arcillas, se encuentra que aparte de Montmorillonita también predomina la Vermiculita, la cual es un tipo de arcilla expansiva, que puede traer inconvenientes de permeabilidad, provocando erosión en el suelo.

- Zona 3 Sur

En esta zona se identifican los parámetros de método de riego, con baja eficiencia, la predominancia de tipo de arcilla se encuentra la Montmorillonita, en tipos de suelos vertisoles que lo constituyen sedimentos con una elevada proporción de arcillas

esmectíticas, seguido por una concentración salina en la fase soluble con valores menores al 1.2 (dS/m), y un pH con valores oscilantes entre 7 y 8.5.

Para estas zonas de vulnerabilidad alta identificadas, se pueden desarrollar diferentes recomendaciones para mitigar el impacto negativo de estos parámetros sobre la zona vulnerable, se podría hacer más eficiente el uso del recurso hídrico, por tanto, se recomienda cambiar los métodos de riego de baja y mediana eficiencia, por prácticas eficientes, como el riego por goteo y microaspersión, con el de obtener un sistema de riego uniforme en el suelo, evita la percolación profunda de agua, nutrientes y ahorro energético. Respecto a las prácticas de fertilización, según Valencia & Rodríguez (2015), hay que corregir el criterio de selección del fertilizante, en ocho de los nueve cultivos se fertiliza aún sin un estudio de suelo, tomando el riesgo de aplicar más del fertilizante requerido al no conocer las cantidades contenidas en el suelo o por el contrario se corre el riesgo de aplicar menos del necesario y tener una producción menor a la esperada, por tanto se recomienda capacitar a los agricultores sobre los requerimientos del suelo y cultivo, para hacer un uso eficiente del fertilizante, sin que ocasione represamiento de nutrientes, hasta el punto de un efecto contrario del fertilizante como erosión o pérdida de fertilidad del mismo, además es necesario realizar un estudio de suelo antes de la siembra para los cultivos periódicos y para cultivos permanentes. Para acidificar un poco el pH, de valores superiores a 7.5, se recomienda la aplicación de una enmienda con sulfato de hierro (es un acidificante a corto plazo y adicionalmente aporta una pequeña cantidad de hierro asimilable), en combinación con un buen aporte de materia orgánica (la descomposición de la materia orgánica tiene una reacción ácida. Los restos orgánicos como turba, estiércol, mantillo, acículas de pino, ácidos húmicos y fúlvicos, son acidificantes) y la supresión de fertilizantes alcalinizantes.

7. CONCLUSIONES

El análisis espacial de los siete factores normalizados fue una herramienta que permitió categorizar el Índice de vulnerabilidad de los suelos a la sodicidad (IVSSod) en la zona de estudio del Distrito RUT. Este índice dio como resultado concreto, que el 78.1% (8610 ha) del área total del Distrito RUT presentan como vulnerabilidad media y un 18.8% (2076.7 ha) del área total del Distrito RUT presenta vulnerabilidad alta, resultante de parámetros con mayor influencia en la vulnerabilidad del suelo, tales como: prácticas de riego, mineralogía de arcillas y concentración de sales en fase soluble. Solo el 3% (334.9 ha) logran tener una vulnerabilidad baja, de la totalidad de la zona de estudio. Estos valores indican que aproximadamente el 96.9% del suelo cultivable del Distrito RUT tiene tendencia a procesos de sodificación.

Los parámetros que inciden en que el suelo sea vulnerable a la sodicidad se dividen en tres grupos de importancia, en el primer grupo con mayor peso de influencia se encuentra las prácticas de riego, mineralogía de las arcillas y la concentración de sales en la fase soluble del suelo, en el segundo grupo de importancia se encuentran parámetros como las prácticas de fertilización y el pH y dentro de los parámetros de menor son el contenido de materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico.

La zona norte (zona 1) de alta vulnerabilidad identificada, predominan los factores de métodos de riego, mineralogía de arcillas, pH y concentración de sales en fase soluble, en la zona centro (zona 2), se identifican los mismos factores de la zona 1, sumando las prácticas de fertilización inadecuadas. En la zona sur (zona 3), inciden los mismos parámetros de la zona 1. El pH y CE, en toda la zona de alta vulnerabilidad, conservo valores de 7-8.5 y <1.2 respectivamente.

La zona de alta vulnerabilidad cuenta con una predominancia de suelos vertisoles con arcillas tipo 1:1 (Montmorillonita), métodos de riego de baja eficiencia, un pH del 7 a 8.5, prácticas de fertilización inadecuadas y medianamente adecuadas, CE <1.2 (dS/m),

contenido de materia orgánica del 1.5 al 3% y una capacidad de intercambio catiónico del 15 al 30 (meq/100g) en el suelo.

Los grados de importancia asignados para cada parámetro identificado fueron prácticas de riego (0,187), mineralogía de las arcillas (0,181), concentración de sales en la fase soluble del suelo (0,175), prácticas de fertilización (0,142), pH (0,131), contenido de materia orgánica (0,098), y la capacidad de intercambio catiónico (0,086), dando la sumatoria de 1, de los cuales los valores altos, son los parámetros de mayor peso de incidencia en el suelo para la vulnerabilidad a la sodicidad, en la zona de estudio el Distrito de riego RUT.

8. RECOMENDACIONES

Dada la importancia del distrito de riego RUT para el norte del Valle del Cauca y para el Departamento en general y ante las evidencias de la Vulnerabilidad media y alta de sodicidad en el suelo, se sugiere llevar a cabo campañas de capacitación en planeación de la fertilización y manejo de productos agroquímicos. Se debe pensar en un grupo de asesoría al agricultor en aspectos de fertilización y manejo del riego, la promoción del riego con métodos eficientes de aplicación y programación. Implementación de contenido de materia orgánica al suelo, en el caso de las zonas con vulnerabilidad a la sodicidad de suelos.

Para las autoridades ambientales se recomienda continuar con el monitoreo de la degradación química y física del suelo anualmente, así mismo avanzar en el conocimiento de la amenaza y la vulnerabilidad, como la fase inicial de un proceso de gestión del riesgo de degradación de suelos.

Por último y no menos importante se recomienda hacer una futura investigación que profundice en el tema, permitiendo dar el reconocimiento de importancia que tiene el índice de Vulnerabilidad a suelos magnésicos, ya que hay poca información existe frente al tema. Así mismo realizar un seguimiento continuo a cada uno de los parámetros identificados influyentes en las zonas de alta vulnerabilidad del suelo a la sodicidad determinadas en el estudio.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARRIAGADA, C. (2001) Servicios sociales y vulnerabilidad en América Latina: conceptos, medición e indagación empírica. Seminario Internacional Las diferentes expresiones de la Vulnerabilidad Social en América Latina y el Caribe. (20 y 21 junio). CEPAL / CELADE. Santiago de Chile.
- ARANCIBIA, S., CONTRERAS, E., MELLA, S., TORRES, P., & VILLABLANCA, I. (2003). Evaluación Multicriterio: aplicación para la formulación de proyectos de infraestructura deportiva. Memoria de Ingeniería Civil Industrial Universidad de Chile, Santiago.
- Arora, S. (2017). Diagnostic properties and constraints of salt-affected soils. En S. Arora, A. Singh, & Y. Singh, *Bioremediation of Salt Affected Soils: An Indian Perspective* (págs. 41-52). Lucknow, India: Springer International Publishing.
- BALAGUERA-LÓPEZ, H., ÁLVAREZ, J., MARTÍNEZ, G., & Balaguera, W. (2011). El contenido de arcilla del suelo influye en el rendimiento de un cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Colombiana De Ciencias Hortícolas*, 3(2), 199-209.
- BARRAL, M.T., ARIAS, M & DIAZ, F. (1997). Influencia del hierro y aluminio en el contenido de materia orgánica del suelo. *Nova Acta Científica Compostelana (Biología)* 7. pp. 137-146.
- BOSQUE SENDRA, J. (1997): *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid, Rialp. 2da Edición.
- BRADY, N.C. (2004). *The nature and properties of soils*, 9th ed. Collier, Mac Millan Publisher, New York, Ny.
- BULLINGER-WEBER, G.; L. RENÉE-CLAIRE Y JEAN-MICHEL. (2006). Influence of some physicochemical and biological parameters on soil structure formation in alluvial soils. *Eur. J. Soil Biol.* 1-14.
- BUZAI, G. D. Y BAXENDALE, C. A. (2006): *Análisis socioespacial con sistemas de información geográfica*. Buenos Aires, UBA-GEPAMA.
- CARDONA, O.D. (1993). Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo “Elementos para el Ordenamiento y la Planeación del Desarrollo”. En Maskrey, A.

Los Desastres No Son Naturales. Red de Estudios en Prevención de Desastres en América Latina. pp. 45-65.

- CARRILLO RUEDA, D. E. (2020). “Análisis espacial multicriterio para la determinación de zonas de expansión urbana de acuerdo a la integración de componentes territoriales en el cantón Latacunga”.
- CASAS FLORES, R. A. Q. U. E. L. (2012). El suelo de cultivo y las condiciones climáticas. Editorial Paraninfo.
- CESPEDES, R. (1998). La salinidad del suelo y del agua de riego y su relación con los cultivos. Proyecto: Validación de tecnología de riego en el valle del Huasco. Cartilla divulgativa.
- CHAMBOULEYRON, J.L. (1980) Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería. Tomo II Fascículo 4.3.2. Riego y drenaje. Editorial ACME.
- Chávez C., M., Binnqüist C., G., & Salas F., A. (2017). Evaluación multicriterio de la vulnerabilidad biofísica ante inundaciones en la subcuenca río Atoyac-Oaxaca de Juárez. Revista Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, 10, 97-109. doi:10.19136/era.a4n10.816
- CISNEROS, R. (2003). Apuntes de la Materia de Riego y Drenaje. Centro de Investigación y Estudios de Posgrado y Área Agrogeodésica. Universidad de San Luis de Potosí. México. pp. 164
- Comisión Europea. Agricultura y Desarrollo Rural. (2009). Salinización y Sodificación. Ficha Informativa No. 4. En Comisión Europea, Relaciones entre los procesos de degradación del suelo, las prácticas agronómicas no perjudiciales para el suelo y las medidas adoptadas en relación con ello (págs. 13-16).
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR. (2018). Diagnóstico y monitoreo de degradación de suelos por salinización en la cuenca del río Machetá, jurisdicción CAR a escala 1:25.000. Bogotá D.C.
- CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA (CVC). (2004). El Valle del Cauca hacia el 2012, Santiago de Cali, 2004.
- Courel, F. (2019). Guía de estudio. Suelos salinos y sódicos. San Miguel de Tucumán, Argentina: Universidad Nacional de Tucumán.

- DALALAH, D., HAYAJNEH, M. & BATIEHA, F. (2011). A fuzzy multi-criteria decision making model for supplier selection.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística, DANE. (2014). 3er Censo Nacional Agropecuario. Bogotá D.C.
- DOU, Y., ZHU, L. & SIMON, H. W. (2012). Solving the fuzzy shortest path problem using multi-criteria decision method based on vague similarity measure.
- DRIESSEN, P., & DUDAL, R. (1991). The major soils of the world: Lectures notes on their geography, formation, properties and use. Wageningen: Katholieke Universiteit Leuven.
- Echeverri S., A., Pérez, C., & Urrutia C., N. (2015). Aproximación Metodológica para la Evaluación del Riesgo de Salinización de Suelos en Zonas Bajo Riesgo. Entornos, 28(2), 112-117. doi:<https://doi.org/10.25054/01247905.1238>
- ESPINOSA, M., ANDRADE, E., RIVERA, P., ROMERO, A. (2011) Degradación de Suelos por Actividades Antrópicas en el Norte de Tamaulipas, México. Revista Papeles de Geografía. México 2011, 53-54. pp 77-88.
- FAO y UNEP. (1984). Metodología Provisional para la Evaluación y la Representación Cartográfica de la Desertificación. Roma.
- FAO, FIDA, UNICEF, PMA y OMS. (2018). El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo. Fomentando la resiliencia climática en aras de la seguridad alimentaria y la nutrición. FAO, Roma.
- FAO, Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y GTIS, Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo. (2015). Estado mundial del recurso suelo. Resumen técnico. Roma: Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo GTIS.
- FAO. (2002). La sal de la tierra: peligro para la producción de alimentos. Disponible en www.fao.org/worldfoodsummit/spanish/newsroom/focus/focus1.htm.
- FAO. (2002). Los Fertilizantes y Su Uso una Guía de Bolsillo para los Oficiales de Extensión. Food & Agriculture Org..
- FAO. (2006). Dirección de estadísticas de la FAO. http://www.fao.org/es/ess/es/index_es.asp

- FAO. (2011). TERRASTAT: Major soil constraints (Sodicity, Shallowness, Erosion Risk) Disponible en www.fao.org/ag/agl/agll/terrastat/.
- FEICK R. (2010). Spatial multicriteria evaluation. In Warf B. ed. Encyclopedia of geography. Thousand Oaks, Ca, USA. SAGE Publications. p. 2656-2658.
- FERRANDO A., FRANSISCO J. (2003). En torno a los desastres naturales: Tipología, conceptos y reflexiones. Revista INVI, 18(47),15-31.
- Flowers, T.L. (2004). Improving crop salt tolerance. Journal of Experimental Botany, Vol. 55, No. 396, pp. 307±319.
- FONT, G. (2000). Gestión de la información en la utilización del proceso analítico jerárquico para la toma de decisiones de nuevos productos.
- FONTANA V, RADTKEB A, BOSSI FEDRIGOTTIB V, TAPPEINERA U, TASSERC E, ZERBEB S, BUCHHOLZD T. 2013. Comparing land-use alternatives: Using the ecosystem services concept to define a multi-criteria decision analysis. Ecological Economics 93: 128-136.
- GARCÍA, A. (2009). Manejo de suelos con acumulación de sales. In Memorias VIII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelos, Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo, Esmeraldas, Ecuador (pp. 8-10).
- GARCÍA, A., (1997). Uso de vinazas en la recuperación de suelos sódicos. Acta Agronómica; Vol. 47, no. 2 Abr – Jun. 1997; p. 39 – 44.
- GINÉS, I., & MARISCAL-SANCHO, I. (2002). Incidencia de los fertilizantes sobre el pH del suelo. UPM: Madrid, Spain, 1-9.
- GOLIK, S.I. (2017) Manual de buenas prácticas agrícolas. compilado por Silvina Inés Golik . [et al.]. - 1a ed . – Universidad Nacional de La Plata. 2017. 101 p
- GRAJALES-QUINTERO, A., SERRANO-MOYA, E. D., & HAHN VON-H, C. M. (2013). Los métodos y procesos multicriterio para la evaluación. Luna Azul, (36), 285-306.
- GRAZIANO, D., & SILVA, J. en [línea]. Portal de suelos de la FAO. Roma: FAO, 2012- [fecha de consulta: 25 octubre 2020].
- HALLIWELL, D. J., K.M. BARLOW AND D. M. NASH. 2001.A review of the effects of wastewater sodium on soil physical properties and their implications for irrigation systems. Australian Journal of Soil Research 39(6) 1259 – 1267

- HERNÁNDEZ, R., FERNÁNDEZ, C. Y BAPTISTA, P. (2006). Metodología de la Investigación. 5 Ed. McGraw Hill, México. 497p.
- HERRADA, J. Disminución de los Efectos de sodicidad con aplicación de Vinaza en un suelo del Valle del Cauca-Colombia. Universidad Nacional-Sede Palmira. Colombia. 2009.
- HIGUERA, C., GÓMEZ, J. C, PARDO, O.E (2012) Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio. Facultad de Ingeniería, vol. 21, núm. 32, enero-junio. Tunja. pp. 21-40
- http://www.desenredando.org/public/articulos/2007/articulos_omar/Gestion_Riesgo_Ciudad_Laboratorio21-09-05LaRED.pdf.
- IBARRA, D., RUIZ, J. A., FLORES, J.G., GONZÁLEZ D.R. (2007) Distribución espacial del contenido de materia orgánica de los suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco Terra Latinoamericana, vol. 25, núm. 2, abril-junio, pp. 187-194.
- IDEAM, MADS, U.D.C.A 2015. Estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia - 2015. IDEAM. Bogotá D.C., Colombia., 188 p. Publicación aprobada por el IDEAM, diciembre de 2015, Bogotá D.C., Colombia.
- IDEAM. (2017). Mapa Nacional de Degradación de Suelos por Salinización. Bogota D. C. Disponible en www.ideam.gov.co/documents/24277/69989379/Lanzamient+mapa+Salinizacion+FN+0PT.pdf/624515d-41ef-b1ef-bb7e868680f3/
- IDEAM. 2019. Estudio nacional de la degradación de suelos por salinización. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. 188 p.
- IGAC, IDEAM y MAVDT. (2010).). Protocolo para la Identificación y Evaluación de los Procesos de Degradación de Suelos y Tierras por Salinización. Bogotá D.C.
- JAISWAL, R. K., GHOSH, N. C., GALKATE, R. V., & THOMAS, T. (2015). Multi Criteria Decision Analysis (MCDA) for Watershed Prioritization. Aquatic Procedia, 4 (Icwrcoe), 1553–1560. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.201>
- JARAMILLO, D. (2002). Introducción a la Ciencia del Suelo. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. Pag, 364, 366.
- LAL, R. (2000). Soil management in the developing countries. Soil Science, 165(1), 57-72.

- Lavado, R. S. y M. A. Taboada. (2009). Los procesos de salinización globales y específicos de la pampa húmeda. 1er Congreso de la Red Argentina de Salinidad.
- LAVELL, A. (2001) Sobre la gestión del riesgo: apuntes hacia una definición. Scripta Nova-Revista. Universidad de Barcelona. España.
- LONGLEY, P.A., GOODCHILD, M.F., MAGUIRE, D.J. AND RHIND, D.W. (2005): Geographic Information Systems and Science. Chichester, Wiley. 2nd edition.
- LÓPEZ, R. 2002. Degradación del Suelo: Causas, procesos, evaluación e investigación. Universidad de Los Andes, Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental Y Territorial, Mérida, Venezuela. p8, 55,223-226,246-248.
- LORA, S. R. (2010). Propiedades químicas del suelo. En SCSC, CIENCIA DEL SUELO Principio básicos (págs. 73-138). Bogota: Editora Guadalupe S.A.
- LOSADA, A. (1997). Fundamentos de la hidrología y de la práctica de los riegos. ETSIA, Universidad Politécnica de Madrid.
- Lugo M., D., & Rey, J. (2009). Evaluación de la vulnerabilidad a la degradación agroambiental a través del uso del sistema microLEIS en los suelos de los llanos centrales de Venezuela. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 25(1), 43-60.
- MAAS, E.V. (1990). Crop salt tolerance. En: Agricultural Salinity Assessment and Management (Tanji, K.K., ed.), pp. 262-304. Amer. Soc. Civil Eng., ASCE Manual and Reports on Engineering Practice N°. 71, ASCE, New York.
- MADS. (2016). Política para la Gestión Sostenible del Suelo. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. República de Colombia. Bogotá.
- MALCZEWSKI J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature International Journal of Geographical Information Science 20(7): 249-268.
- MARTINEZ, Z., (2003) Guías prácticas para situaciones específicas: manejo de riesgos y preparación para respuestas a emergencias mineras. CEPAL. Santiago de Chile.

- Méndez Yustres, C. A. (2015). Evaluación de las propiedades físico. químicas y biológicas de un suelo sodico del Guacanal-Cerrito (Valle del Cauca) tratado con un inoculante biológico. (Doctoral dissertation).
- Mendoza M., J., & Orozco H., M. (2014). Análisis de la vulnerabilidad biofísica a los riesgos por inundación en la zona metropolitana de Toluca, México. *Revista Luna Azul*(38), 86-104.
- MENDOZA, G. A. & MARTINS, H. (2006). Multi-criteria decision analysis in natural resource management: A critical review of methods and new modelling paradigms.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016). Política para la gestión sostenible del suelo. Bogotá D.C., Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible. (2005). Plan de Acción Nacional. Lucha contra la desertificación y la sequía en Colombia. Bogotá D.C.: Dirección de Ecosistemas, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible.
- MINISTERIO DEL AMBIENTE (2014) Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas. Anexo B. Gestión del Riesgo. Colombia.
- MOLINA, N. C. (2018). Suelos ácidos, salinos y sódicos 2018. Cátedra Edafología. FAZ-UNT
- MUNDA, G., (2004). Social multi-criteria evaluation: Methodological foundations and operational consequences.
- OLDEMAN, L. Y VAN LYNDEN, G. (1998). Revisiting the GLASOD methodology. *Methods Assess Soils Degrad Advances Soils Science Series*: 423-440.
- ORÚS, F., BETRÁN, J., IGUÁCEL, F., & LÓPEZ, M. V. (2011). Fertilización con subproductos orgánicos: hacia una gestión sostenible de los nutrientes en la agricultura. *Informaciones Técnicas*, (232).

- OSTER, J. D., Y I. SHAINBERG. (2001). Soil responses to sodicity and salinity: challenges and opportunities. *Australian Journal of Soil Research* 39(6) 1219 – 1224
- OTERO GOMEZ, Lázara et al. Modificación al método Schatchabell para la determinación de las bases intercambiables en suelos con salinidad. *cultrop* [online]. 2013, vol.34, n.4, pp.20-23. ISSN 0258-5936.
- PEREIRA, R. (2009). Sodicity and salinity in a Brazilian Oxisol cultivated with sugarcane irrigated with wastewater . *Agricultural Water Management* 96(2):307-316
- PERFETTI, J. J., DELGADO, M., BLANCO, J., PAREDES, G., GARCÍA, A., NARANJO, J., ... & GONZÁLEZ, L. (2019). Adecuación de tierras y el desarrollo de la agricultura colombiana: políticas e instituciones (No. 017614). Fedesarrollo.
- PLA, I. (1997). Evaluación de los procesos de salinización de suelos bajo riego. *Edafología*. 241-267. SECS (Spain)
- PLA, I. (2002). Hydrological approach to soil and water conservation. En (J.L. Rubio y col, Ed) *Man and Soil at the Third Millenium*. I:65-87. Geoforma Ed. Logroño (España)
- PLA, I. (2006). Problemas de Degradación de Suelos en América Latina: Evaluación de Causas y Efectos. X Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Ecuador.
- PLA, I. (2006). Problemas de Degradación de Suelos en el Mundo: Causas y Consecuencias. X Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Ecuador.
- PLA, I. (2014). Nuevas experiencias en la evaluación y diagnóstico de procesos de salinización y sodificación de suelos en américa latina. *Suelos Ecuatoriales*, 44(2), 125-137.
- PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE (2010). Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos, 4ta Edición. Pelsylvania, USA : PMI Publications.
- QUINTANILLA, E., GAMBOA, H., VARGAS, J., CLASING, O., URZUA, G., ABARCA E. (2011). Manual de Procedimientos para la Prevención de Riesgos. Universidad de Chile.

- RAMIREZ, V. (2009) Las arcillas alófanas y su relación con las propiedades físicas y químicas del suelo. Corporación Universitaria Santa Rosa de Cabal. Vol 7(1): 30-38.
- RENGASAMY, P Y OLSSON, K.A.,1991. Sodicity and Soil Structure. Australian Journal of Soil Research, 22: 413-431.
- RENGASAMY, P Y OLSSON, K.A.,1991. Sodicity and Soil Structure. Australian Journal of Soil Research, 22: 413-431
- RHOADES, J.D. (1997). Sustainability of irrigation: An overview of salinity problems and control strategies. Annual Conference: Footprints of Humanity. Reflection.
- RODRIGUEZ, C. (2009) Ordenamiento Territorial y Gestión de Riesgos. Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo. Guatemala.
- ROJAS, O., MARTÍNEZ, C. (2011). Riesgos naturales: evolución y modelos conceptuales. Revista Universitaria de Geografía, 20 , 83-116.
- RUIZ BAENA, N. (2017). La salinidad del agua de riego y del suelo. Instituto de investigación y formación agraria y pesquera.
- SAATY, T. 1997. Toma de Decisiones Para Líderes. Universidad de Santiago de Chile.
- SAATY, T. L. (1994). How to make a decision: The analytic hierarchy process. Interfaces, 24(6), 19–43. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- SAATY, T. L. (1994). How to make a decision: The analytic hierarchy process. Interfaces, 24(6), 19–43. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- STIRLING, A. (2006). Analysis, participation and power: justification and closure in participatory multi-criteria analysis. Land use policy, 23, 95-107.
- THOMAS L. SAATY, “The Analytical Hierarchical Process”, J. Wiley, New York, 1980
- THOMAS, J. (2011). Desarrollo y gestión social del riesgo: ¿una contradicción histórica? Revista de geografía Norte Grande, (48), 133-157.
- TOSKANO, G., & BRUNO, G. (2005). El proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores. Trabajo de grado. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú.

- UNIVERSIDAD AGRARIA DE GUAYAQUIL (Ecuador) Ministerio de Agricultura y Ganaderia, Quito (Ecuador). Programa de Modernizacion de Servicios Agropecuarios. (2004). La salinidad de los suelos y sus efectos en la agricultura. In Proyecto: Estudios de metodologias para la validacion de un modelo predictivo para el manejo y control de la salinidad del suelo y del agua en la peninsula de Santa Elena, provincia del Guayas, Ecuador.
- USDA. (1999). Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo.
- VALENCIA, O., RODRÍGUEZ, A. (2015) Valoración de la vulnerabilidad a la salinización de los suelos del distrito de riego y drenaje RUT por las prácticas de fertilización. Proyecto de pregrado en ingeniería agrícola, Universidad del Valle. Cali, Colombia.
- WEN-HSIANG, W., CHANG-TZU, CH. & CHIN-TSAI L. (2008). Comparing the aggregation methods in the analytic hierarchy process when uniform distribution.
- YAÑEZ, V. MUÑOZ, C. DZIEKONSKI, M. (2017) Vulnerabilidad socio-territorial: posibilidad de determinarla a partir de una construcción metodológica. Revista Geográfica Venezolana, vol. 58, núm. 1. Universidad de los Andes
- ZINCK, A. (2005). Suelos, información y sociedad Gaceta Ecológica, núm. 76, julio-septiembre, pp. 7-22marco