

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES

ESCUELA DE POSGRADO

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES



**Vulnerabilidad del acuífero costero Manglaralto mediante los
métodos DRASTIC y DRASTIC-LQ**

TESIS

Para optar el grado académico de Doctor en Ciencias Ambientales

Autor: Mg. Arévalo Ulloa, Marco Antonio

Tumbes, 2022

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES

ESCUELA DE POSGRADO

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES



**Vulnerabilidad del acuífero costero Manglaralto mediante los
métodos DRASTIC y DRASTIC-LQ**

Tesis aprobada en forma y estilo por:

Dr. Puño Lecamaqué Napoleón (Presidente)

Dr. Carrillo Sarango José Modesto (Secretario)

Dr. Reyes Víctor Manuel

(Miembro)

Tumbes, 2022

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES

ESCUELA DE POSGRADO

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES



**Vulnerabilidad del acuífero costero Manglaralto mediante los
métodos DRASTIC y DRASTIC-LQ**

**Los suscritos declaramos que la tesis es original en su
contenido y forma**

Mg. Arévalo Ulloa Marco Antonio (Autor)

Dr. Deza Navarrete Carlos Alberto (Asesor)

Ph. D. Carrión Mero Paúl (Coasesor)

Tumbes, 2022

Copia del acta de Sustentación



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES
Licenciada
Resolución del Consejo Directivo N°155-2019-SUNEDU/CD
ESCUELA DE POSGRADO
Tumbes – Perú

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS – POSGRADO

En Tumbes, siendo las VEINTIUN horas con CEERO minutos del día siete de octubre año dos mil veintidós, se reunieron mediante la modalidad virtual por la plataforma meet google.com los miembros del Jurado Evaluador conformado con la Resolución Directoral N°0324-2021/UNTUMBES-EPG-D de fecha seis de octubre del dos mil veintiuno: Dr. Napoleón Puño Lecarnaque (Presidente); Dr. José Modesto Carrillo Sarango (Secretario); Dr. Víctor Manuel Reyes (Miembro), para proceder al acto de sustentación y defensa de la Tesis titulada: "**Vulnerabilidad del acuífero manglaralto mediante los métodos DRASTIC y DRASTIC - LQ**" presentada por el Mg. Marco Antonio Arévalo Ulloa, para optar el grado académico de **Doctor en Ciencias Ambientales**.

Participando en la condición de Asesor, el Dr. Carlos Alberto Deza Navarrete.

Concluido el acto de sustentación y defensa, absueltas las preguntas formuladas y efectuadas las correspondientes observaciones, el jurado evaluador dictamino declarar: APROBADA la tesis por UNANIMIDAD con el calificativo de SOBRESALIENTE, en conformidad con lo normado en el artículo 91 del Reglamento de Tesis para Pregrado y Posgrado de la Universidad Nacional de Tumbes.

Siendo las DI'Z horas con TREINTA minutos del mismo día, mes y año, se dio por concluido el acto académico y en señal de conformidad se procedió a la firma de la presente acta.

Tumbes, 07 OCTUBRE de 2022

Dr. NAPOLEON PUÑO LECARNAQUE
DNI N° 00225904
ORCID N° 00250088085

PRESIDENTE

Dr. VICTOR MANUEL REYES
DNI N° 002883155
ORCID N° 0000-0002-8336-0444

MIEMBRO

Dr. JOSÉ MODESTO CARRILLO SARANGO
DNI N° 00 223850
ORCID N° 0003-0841-3064

SECRETARIO

Dr. CARLOS ALBERTO DEZA NAVARRETE
DNI N° 16532820
ORCID N° 0000-0002-3324-3741

ASESOR

Dedicatoria

A mi novia amada PhD. Gloria Elena Tomalá Caicedo; por brindarme su cariño, apoyo incondicional, amor sincero en todo el transcurso de mis tesis de postgrado.

.

Marco Antonio Arévalo Córdova: mi mejor amigo, padre querido; por estar pendiente en todos los momentos de mi vida.

Martha Ulloa Guzmán: madre por estar presente en el diario vivir, aunque te encuentres a muchos kilómetros de distancia.

Diana, José, Jeremy: hijos de mi vida, los cuales llenan mis días de mucha emoción.

Karen, Inés, Alex, Julyhana, Jordy: hermanos que los llevo presentes.

Marco Arévalo Ulloa.

.

Agradecimientos

A mi prestigiosa Universidad Nacional de Tumbes por haberme abierto sus puertas para adquirir conocimientos científicos y ser aplicados en la naturaleza así tendremos una calidad de vida en nuestro ecosistema.

Dr. Carlos Alberto Deza Navarrete: Asesor, profesor, amigo incondicional que brinda sus enseñanzas académicas con mucho énfasis, entusiasmo y llegar a un objetivo el cual es formar profesionales de calidad.

Dr. Cesar Paúl Carrión Mero: Coasesor, amigo en el cual hemos trabajado en varios congresos nacionales e internacionales. Mis más sinceros agradecimientos.

Dr. Miguel Antonio Puestas Chully: amigo colaborador en todo momento solicitado y su transparencia de nobleza hacia todos los cursantes del doctorado en Ciencias Ambientales.

Dr. Víctor Manuel Reyes: profesor, amigo; que participamos en sus clases con mucho dinamismo y optimismo en su catedra profesional.

Marco Arévalo Ulloa

ÍNDICE GENERAL

	Página
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
RESUMO	xiii
CAPITULO I.....	14
1. INTRODUCCIÓN	14
CAPITULO II.....	20
2. REVISIÓN DE LITERATURA	20
2.1. Bases teórico científicas	20
Acuíferos costeros	22
2.2. Antecedentes de la investigación	31
CAPÍTULO III.....	37
3. MATERIALES Y MÉTODOS	37
3.1. Tipo de Estudio	37
3.1.1. Diseño de contrastación de hipótesis	37
3.2. Población, Muestra y Muestreo.....	38
3.3. Métodos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	39
3.4. Plan de procesamiento y análisis de datos.....	40
3.4.1. Recopilación de base de datos	41
3.4.2. Procesamiento y análisis de la información	41
3.4.3. Procesamiento gráfico de los parámetros.....	42
3.4.4. Fase de contraste de hipótesis y de informe final.....	42
CAPITULO IV	43
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
4.1. Resultados.....	43
4.1.1. Vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas del acuífero costero Manglaralto mediante el método DRASTIC.....	43
4.1.2. Vulnerabilidad estacional del acuífero para el año 2019	43
4.1.3. Vulnerabilidad estacional del acuífero para el año 2021	46
4.1.4. Vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas del acuífero costero Manglaralto mediante el método DRASTIC-LQ.....	48
4.1.5. Vulnerabilidad estacional del acuífero para el año 2020	50
4.1.6. Vulnerabilidad estacional del acuífero para el año 2021	52
4.1.3.7. Comparación entre los índices de vulnerabilidad DRASTIC y DRASTIC-LQ.....	54
4. 2. Discusión	60

4.2.1. Vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas del acuífero costero Manglaralto mediante el método DRASTIC.....	60
4.2.2. Vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas del acuífero costero Manglaralto mediante el método DRASTIC-LQ.....	61
4.2.3. Comparación entre los índices de vulnerabilidad DRASTIC y DRASTIC-LQ para el período 2019-2021.....	63
CAPITULO V	65
5. CONCLUSIONES	65
CAPITULO VI	67
6. RECOMENDACIONES.....	67
CAPÍTULO VII	68
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
CAPÍTULO VIII	74
8. ANEXOS	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clases de vulnerabilidad.....	24
Tabla 2: Pesos de los parámetros del método DRASTIC.....	26
Tabla 3: Descripción de los parámetros del método DRASTIC.....	28
Tabla 4: Rango de valores para la conductividad hidráulica.....	29
Tabla 5: Índices, rangos y grado de vulnerabilidad del modelo DRASTIC.....	29
Tabla 6: Comparación entre los índices de vulnerabilidad DRASTIC y DRASTIC-LQ para el año 2019: temporadas lluviosa y seca.....	55
Tabla 7: Comparación entre los índices de vulnerabilidad DRASTIC y DRASTIC-LQ para el año 2020: temporadas lluviosa y seca.....	56
Tabla 8: Comparación entre los índices de vulnerabilidad DRASTIC y DRASTIC-LQ para el año 2021: temporadas lluviosa y seca.....	58
Tabla 9: Comparación Entre Los Índices De Vulnerabilidad DRASTIC y DRASTIC-LQ para el período 2019-2021.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1: Rangos y ponderación por parámetros del modelo DRASTIC.....	27
Figura 2: Mapa de Ubicación de los pozos y dique en la zona de estudio.	39
Figura 3: Fases de la investigación.	40
Figura 4: Método DRASTIC: Mapa de vulnerabilidad (febrero 2019).	44
Figura 5: Método DRASTIC: Mapa de vulnerabilidad (julio 2019).....	44
Figura 6: Mapa de vulnerabilidad. Método DRASTIC (febrero 2020).	45
Figura 7: Método DRASTIC: Mapa de vulnerabilidad (julio 2020).....	46
Figura 8: Método DRASTIC: Mapa de vulnerabilidad (febrero 2021).	47
Figura 9: Método DRASTIC: Mapa de vulnerabilidad (julio 2021).....	48
Figura 10: Método DRASTIC-LQ: Mapa de vulnerabilidad (febrero 2019).	49
Figura 11: Método DRASTIC-LQ: Mapa de vulnerabilidad (julio 2019).....	50
Figura 12: Método DRASTIC-LQ: Mapa de vulnerabilidad (febrero 2020).	51
Figura 13: Método DRASTIC-LQ: Mapa de vulnerabilidad (julio 2020).....	52
Figura 14: Método DRASTIC-LQ: Mapa de vulnerabilidad (febrero 2021).	53
Figura 15: método DRASTIC-LQ: mapa de vulnerabilidad (julio 2021).....	54

RESUMEN

El trabajo analiza la vulnerabilidad del acuífero costero Manglaralto mediante los métodos DRASTIC y DRASTIC-LQ. Se seleccionarán 10 pozos distribuidos en el acuífero costero de Manglaralto debidamente georeferenciados. Se diseñó un contraste de hipótesis para determinar: a) Diferenciación estacional de los índices de vulnerabilidad; b) Diferenciación de los índices de vulnerabilidad para la serie 2019-2021. Se empleó para tal fin test de comparación no paramétrico de rangos con signo de Wilcoxon ($\alpha: 0.05$) entre los índices de vulnerabilidad DRASTIC y DRASTIC-LQ, considerando como meses indicadores febrero (temporada lluviosa) y julio (temporada seca). Una vez seleccionados los rangos de cada parámetro, se procedió a la creación de capas mediante el software ArcGis 10.5. Se demostró que existe una vulnerabilidad la cual fue estimada por igual mediante los métodos DRASTIC y DRASTIC-LQ, que varió entre baja y muy alta. Se evidenció también una variabilidad estacional que sugiere la influencia de los niveles freáticos y la escorrentía sobre el sistema, en asociación con las condiciones morfológicas de la zona, y de los factores añadidos al modelo DRASTIC como son la recarga lateral (L) y la influencia de una recarga zonificada, en este caso mediante un dique (Q). La comparación de índices de vulnerabilidad (DRASTIC vs DRASTIC-LQ) para el período 2019-2021 arrojó diferencias significativas. Estas fueron identificadas estacionalmente y para la serie. En ambos casos se rechazó la hipótesis nula de igualdad de diferencias y magnitudes ($p\text{-valor} \leq 0.05$). Se confirmó que las mayores valoraciones de vulnerabilidad corresponden al índice DRASTIC-LQ, que por tanto resulta mucho más exigente al realizar la estimación de vulnerabilidad del acuífero.

Palabras clave: Aguas subterráneas; Vulnerabilidad en acuíferos; Método DRASTIC; Método DRASTIC-LQ

ABSTRACT

The work analyses the vulnerability of the Manglaralto coastal aquifer using the DRASTIC and DRASTIC-LQ methods. Ten wells distributed in the Manglaralto coastal aquifer will be selected and georeferenced. A hypothesis test was designed to determine: a) Seasonal differentiation of the vulnerability indices; b) Differentiation of the vulnerability indices for the 2019-2021 series. For this purpose, a non-parametric comparison test of ranges with Wilcoxon sign ($\alpha: 0.05$) was used between the DRASTIC and DRASTIC-LQ vulnerability indices, considering February (rainy season) and July (dry season) as indicator months. Once the ranges for each parameter were selected, layers were created using ArcGis 10.5 software. It was shown that there is a vulnerability which was estimated equally by the DRASTIC and DRASTIC-LQ methods, ranging from low to very high. Seasonal variability was also evident, suggesting the influence of water tables and runoff on the system, in association with the morphological conditions of the area, and the factors added to the DRASTIC model such as lateral recharge (L) and the influence of a zoned recharge, in this case by means of a dike (Q). The comparison of vulnerability indices (DRASTIC vs DRASTIC-LQ) for the period 2019-2021 showed significant differences. These were identified seasonally and for the series. In both cases the null hypothesis of equality of differences and magnitudes was rejected ($p\text{-value} \leq 0.05$). It was confirmed that the highest vulnerability assessments correspond to the DRASTIC-LQ index, which is therefore much more demanding when estimating aquifer vulnerability.

Keywords: Groundwater; Aquifer vulnerability; DRASTIC method; DRASTIC-LQ method

RESUMO

O trabalho analisa a vulnerabilidade do aquífero costeiro de Manglaralto usando os métodos DRASTIC e DRASTIC-LQ. Dez poços distribuídos no aquífero costeiro de Manglaralto serão selecionados e georreferenciados. Um teste de hipóteses foi projetado para determinar: a) Diferenciação sazonal dos índices de vulnerabilidade; b) Diferenciação dos índices de vulnerabilidade para a série 2019-2021. Para este fim, foi utilizado um teste não paramétrico de comparação de faixas com o sinal Wilcoxon ($\alpha: 0,05$) entre os índices de vulnerabilidade DRASTIC e DRASTIC-LQ, considerando fevereiro (estação chuvosa) e julho (estação seca) como meses indicadores. Uma vez selecionadas as faixas para cada parâmetro, foram criadas camadas usando o software ArcGis 10.5. Foi demonstrado que existe uma vulnerabilidade que foi estimada igualmente pelos métodos DRASTIC e DRASTIC-LQ, variando de baixa a muito alta. A variabilidade sazonal também foi evidente, sugerindo a influência dos lençóis freáticos e do escoamento no sistema, em associação com as condições morfológicas da área, e os fatores adicionados ao modelo DRASTIC como a recarga lateral (L) e a influência de uma recarga zonada, neste caso por meio de um dique (Q). A comparação dos índices de vulnerabilidade (DRASTIC vs DRASTIC-LQ) para o período de 2019-2021 mostrou diferenças significativas. Estes foram identificados sazonalmente e para a série. Em ambos os casos, a hipótese nula de igualdade de diferenças e magnitudes foi rejeitada ($p\text{-valor} \leq 0,05$). Foi confirmado que as mais altas avaliações de vulnerabilidade correspondem ao índice DRASTIC-LQ, que é, portanto, muito mais exigente ao estimar a vulnerabilidade dos aquíferos.

Palavras-chave: Águas subterrâneas; vulnerabilidade do aquífero; método DRASTIC; método DRASTIC-LQ

CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN

El agua, sin duda alguna, es un recurso natural de vital importancia para las actividades de todos los seres vivos, y es indispensable para la obtención de una calidad de vida (Hoekstra ,2016). El 68.7% de agua dulce se presenta en forma de nieve y hielo en los casquetes polares; el 30.1% se encuentra como aguas subterráneas, y tan solo 1.2% está en la superficie y es identificada en los ríos, lagunas, arroyos, entre otras estructuras que en la atmósfera terrestre se presentan de forma superficial (Geological Survey, 2016).

Es importante destacar que el agua sirve como fuente generadora de electricidad. De allí la necesidad del agua para abastecimiento y saneamiento. Además de su debida gestión para el bienestar económico y social (Organización Mundial de la Salud, 2017; Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia, 2017). La calidad de las aguas subterráneas es indispensable para consumo agrícola o doméstico. Por tal razón, la contaminación de los acuíferos se ha convertido en un problema importante, especialmente en las zonas costeras también amenazadas por la intrusión de agua de mar (Nasri et al., 2021).

La vulnerabilidad de las aguas subterráneas se evalúa a través de distintos métodos; en los acuíferos de Palayamkottai taluk (India): método: SINTACS-LU (Jesudhas, 2021). Cuando existe presencia de nitratos se emplea el método DRASTIC, y propone una modificación a “DRASTIC-N” (Voutchkova, 2021). De acuerdo con La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2012), la gestión y administración del agua en Ecuador es realizada por la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA), la cual se encarga de proporcionar agua de forma equitativa, de buena calidad para consumo humano, de manera justa y accesible para todos los ecuatorianos. Sin embargo, en la provincia costera de Santa Elena

existen problemas al proveer de agua a todos sus habitantes (El Universo, 2015). Las parroquias al sur de la provincia se abastecen mediante el trasvase Daule-Santa Elena, que tiene como origen la cuenca del río Guayas, y los sectores que están al norte, recurren a utilizar el agua de su acuífero costero (Morante, 2019).

Manglaralto, es una parroquia rural de Santa Elena, que utiliza el agua subterránea la cual es realizada por la Junta Administradora Regional de Agua Potable de Manglaralto (JAAPMAN), brindan el servicio mediante 14 pozos perforados a siete comunidades pertenecientes a Manglaralto (Gricelda et al., 2018).

La comunidad de Manglaralto estableció lazos fuertes con la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA), que a su vez, con el apoyo de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), han propuesto soluciones eficaces para solventar el requerimiento del agua (Herrera-Franco et al., 2020). Las técnicas han sido adquiridas para afrontar la crisis a nivel mundial que se enfrentó en el 2020 por el COVID-19, es por ello, que se hace hincapié en la relevancia que posee el acuífero costero Manglaralto, generando resiliencia en sus habitantes, debido a que por sus características climatológicas es considerada una parroquia con escasez de agua (Carrión et al., 2018).

La principal actividad económica es el turismo, donde el recurso hídrico es indispensable, y gracias a la gestión de la JAAPMAN se ha podido cubrir la demanda de agua (Herrera Franco, 2009). La presente investigación, tiene como objetivo: analizar la vulnerabilidad del acuífero costero Manglaralto mediante los métodos DRASTIC y DRASTIC-LQ.

En tal sentido se realiza el planteamiento del problema siguiente: ¿Cuál es la vulnerabilidad del acuífero costero Manglaralto estimada mediante los métodos DRASTIC y DRASTIC-LQ? Del problema surgen los problemas específicos: 1. ¿Cuál es la vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas del acuífero costero Manglaralto mediante el método DRASTIC? 2. ¿Cuál es la vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas del acuífero costero Manglaralto mediante el método DRASTIC-LQ? 3. ¿Qué similitudes y diferencias surgen al comparar los índices de

vulnerabilidad del acuífero costero Manglaralto resultantes de la aplicación los métodos DRASTIC y DRASTIC-LQ?

El propósito de este trabajo fue analizar la vulnerabilidad del acuífero costero Manglaralto mediante los métodos DRASTIC y DRASTIC-LQ. Se señalan los objetivos específicos siguientes: 1. Determinar la vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas del acuífero costero Manglaralto mediante el método DRASTIC. 2. Determinar la vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas del acuífero costero Manglaralto mediante el método DRASTIC-LQ. 3. Comparar los índices de vulnerabilidad del acuífero costero Manglaralto resultantes de la aplicación los métodos DRASTIC y DRASTIC-LQ.

La hipótesis general del trabajo fue que existe una vulnerabilidad del acuífero costero Manglaralto la cual es estimada por igual mediante los métodos DRASTIC y DRASTIC-LQ. Como hipótesis específicas surgieron: 1. La vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas del acuífero costero Manglaralto calculada mediante el método DRASTIC indica una vulnerabilidad moderada. 2. La vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas del acuífero costero Manglaralto calculada mediante el método DRASTIC indica una vulnerabilidad alta producto de los aportes de los factores recarga lateral (L) y la influencia de una recarga zonificada [(dique (Q)]. 3. Los índices de vulnerabilidad del acuífero costero Manglaralto resultantes de la aplicación los métodos DRASTIC y DRASTIC-LQ refleja una diferencia entre ambos siendo mayor el índice DRASTIC-LQ.

Dada la problemática expuesta, la tesis se ajusta y da respuesta a las necesidades a nivel mundial que son reconocidas y combatidas por medio de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) recursos que permitirán evaluar la variable de investigación; para el estudio se han seleccionado los siguientes objetivos: “ODS 1.- Fin de la Pobreza Salud y Bienestar, ODS 3.- Agua limpia y Saneamiento, ODS 6.- Ciudades y comunidades sostenibles, ODS 13.- Acción por el clima y ODS 15.- Vida de ecosistemas terrestres”.

El ODS 1, se destaca en Manglaralto por la correcta administración del agua potable, además de los estudios realizados en torno a la calidad y abastecimiento. Esto genera el constante aporte económico del sector turístico, agrícola y ganadero, además de preservar la salud de sus habitantes mediante el consumo diario doméstico, y entre otros usos.

El ODS 3, se palpa diariamente debido a la resiliencia que genera en los habitantes de Manglaralto, principalmente por la pandemia que se vive a nivel mundial. Es indispensable mantener limpio el entorno donde se vive, a nivel social y personal. En este apartado también se incluye el trato que se tiene con las piscinas de oxidación y aguas residuales. Además, es importante fomentar el correcto uso del recurso hídrico por parte de todos los habitantes.

El ODS 6, se representa en el uso y acogida de nuevas construcciones e infraestructuras en Manglaralto, ya sea para el sector turístico como hoteles y restaurantes, o de uso residencial. En cualquiera de los casos, estos lugares utilizan el agua potable como recurso principal y necesario, contribuyendo en el desarrollo sostenible de la parroquia.

El ODS 13 y el ODS 15, se muestra en la implementación de técnicas artesanales y técnico-artesanal en la construcción de diques (tapes), los cuales pueden ser de piedra, arena o estacas (materiales propios del medio), o de materiales como el hormigón. El objetivo es contener el agua superficial que está presente en el cauce el río, formando una especie de piscina, como resultado se promueve la recarga artificial.

Es indispensable llevar un control respecto a la calidad de agua que se va a ingerir, más aún, cuando es empleada en uso doméstico, puesto que, el saneamiento deficiente desencadena la transmisión de enfermedades (UNICEF, 2017).

Según Arias (2011), argumenta que: “Las aguas residuales, urbanas, industriales y agrícolas, producen diarrea, ocasionada por la ingestión de aguas inadecuadas para la salubridad humana”, y aproximadamente 2 mil millones de personas a nivel

mundial, consumen agua potable con coliformes fecales. Esto ha ocasionado que cerca de 502.000 personas mueran anualmente por diarrea (UNICEF, 2017).

En la Provincia de Santa Elena el 44.82% de su población total habita en zonas rurales (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2010), siendo este un gran número de personas que no tienen acceso al agua potable por gestiones gubernamentales.

Debido a este contexto la investigación encuentra justificación, pues en síntesis, responde a los ODS, permitiendo explorar la vulnerabilidad de acuíferos en una zona urbana, turística, agrícola y ganadera, además de las implicaciones con respecto a la salud de los habitantes.

Las variables consideradas fueron:

Variable 1: Vulnerabilidad mediante el método DRASTIC.

Definición conceptual: El método DRASTIC (Aller et al., 1987) “clasifica y pondera parámetros intrínsecos, reflejo de las condiciones naturales del medio y es el más difundido para determinar la vulnerabilidad de acuíferos” Martínez et al. (1998, p. 414).

Definición operacional:

El método DRASTIC (Aller et al., 1987) “clasifica y pondera parámetros intrínsecos, reflejo de las condiciones naturales del medio y es el más difundido para determinar la vulnerabilidad de acuíferos” Martínez et al. (1998, p. 414). “DRASTIC valora como parámetros: D (profundidad del nivel piezométrico), R (recarga), A (litología del acuífero), S (naturaleza del suelo), T (pendiente del terreno), I (naturaleza de la zona no saturada) y C (permeabilidad)” Martínez et al. (1998, p. 414).

Variable 2: Vulnerabilidad mediante el método DRASTIC-LQ.

Definición conceptual: Modificación del método DRASTIC a partir de la incorporación de los factores Recarga lateral (L) Dique (Q) (Carrión, 2021).

Definición operacional: Valoración de los parámetros: “D (profundidad del nivel piezométrico), R (recarga), A (litología del acuífero), S (naturaleza del suelo), T (pendiente del terreno), I (naturaleza de la zona no saturada) y C (permeabilidad)” Martínez et al. (1998, p. 414), más la incorporación de los factores Recarga lateral (L) Dique (Q) (Carrión-Mero, 2021).

El cuadro de operacionalización de variables se presenta en el anexo 1.

CAPITULO II

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Bases teórico científicas

2.1.1. Vulnerabilidad del acuífero

Margat (1968), introdujo el término “vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación”. Estima la vulnerabilidad como una prioridad para el medio, es decir las capas de la corteza terrestre, el tipo de suelos; ya sean estos: arcillosos, arenosos, francos; los cuales nos ayudaran a permitir la infiltración en mencionados acuíferos y el grado de confianza según el tipo de terreno para poder realizar un acuífero para el consumo diario de los habitantes.

2.1.2. Acuíferos y su clasificación

Los acuíferos son cuerpos geológicos que se encuentran en el subsuelo, los cuales almacenan grandes cantidades de agua. Normalmente, los materiales existentes en dicha zona son materiales porosos y permeables, debido a que son las condiciones para mantener el agua, o, son cuerpos que contienen poros o espacios vacíos como fracturas, las cuales logran capturar y hacer circular el agua.

Acuíferos detríticos: Están conformados por sedimentos detríticos, es decir, materiales granulares como gravas, arenas y limos que pueden estar poco o nada compactados (Mateos et al., 2017).

Acuíferos fracturados: Se caracterizan por una amplia gama de escalas debido a la presencia de fracturas desde la escala milimétrica a la kilométrica y debido a la existencia de correlaciones fractales entre fracturas (Le Borgne et al., 2004). Para conocer la geometría, la red de fracturas y distribución según la circulación de agua deben realizarse estudios geológicos como: balance hídrico, estratigrafía, litología, sistema de fracturas entre otros) (Francese et al., 2009).

Acuíferos kársticos: Algunos de estos son: la descarga, almacenamiento de agua, geomorfología, tipo de flujo y conductividad (Worthington et al., 2017);(Milanović, 2018). Sin embargo, la característica más significativa es la presencia de rocas carbonatadas, especialmente las calizas y dolomías. Aunque pueden estar compuestos por rocas ígneas y metamórficas, pero estas deben estar fracturadas o en disolución.

Acuífero libre: La presión de la superficie de agua es igual a la presión atmosférica. Liberan agua por desaturación, es decir, el agua que ceden es el agua que tienen almacenada en sus poros, y el nivel baja de agua disminuye con cada extracción (Sanchez San Román, 2009).

Acuífero confinado: La presión de la superficie en la que se encuentra el agua es superior a la atmosférica. Al extraer agua ningún poro se va a vaciar. Al descender el nivel, dos son los cambios que se producen: 1) Al bajar la presión a que está sometida el agua, ésta tiende a expandirse; 2) Al bajar la presión interna a la que se encuentra sometido el acuífero por el agua, éste tiende a descomprimirse verticalmente (Batu, 1998).

Acuíferos costeros

Los acuíferos costeros corresponden a otra clasificación, la cual se centra en la ubicación geográfica. Según dicha ubicación, establece los materiales, funcionamiento y mecanismos de los acuíferos para relacionarlos, aunque también se debería tomar en cuenta los eventos y ambientes geológicos. En este caso, la zona de estudio se centra en un área costera. Es decir, el acuífero está muy cercano al mar. Teniendo esto en cuenta se pueden presentar distintos problemas.

Debido al contacto que puede existir entre un acuífero que proporciona agua dulce, la cual es posible que sea consumible, y el agua salada de mar. Según nos indica el ciclo hidrológico del agua, esta clasificación de acuíferos se comporta como una última fase de almacenamiento de agua, debido a que puede retener y transportar el agua, desde la superficie en los ríos, o de otros acuíferos, ya que los conductos son permeables, además, mediante las precipitaciones puede volver a recargarse, por último, puede liberar toda esta agua al mar, donde se origina nuevamente el ciclo natural (Aranda, 1984).

Ventajas de los reservorios acuíferos

Tenemos la protección contra la evaporación, y la recarga artificial lo indispensable es que nos ofrecen agua potable para poder vivir, en lo cual estas aguas son más puras pues han sido filtradas por capas y capas de diferentes tipos de suelos, a diferencia del agua marina que están llenas de sales y minerales (UNIVISION NOTICIAS 2018).

Desventajas de los reservorios acuíferos

El agua subterránea dulce, que se mueve hacia el mar transporta soluto, a medida que se acerca a la zona de playa. En el estudio de Glover (1959), señala que, en condiciones de flujo constante, se forma una interfaz claramente definida entre el

agua dulce y salada. A lo largo de la interfaz, la presión del agua salada es estática, debido a su mayor densidad, se compensa con las presiones que impulsan el agua dulce hacia el mar. El agua dulce se escapa, a través de un espacio entre esta interfaz y la línea de costa. La acción de las mareas provoca una difusión de agua salada, a través de la interfaz y la sal se devuelve al mar con el flujo de agua dulce.

2.1.3. La vulnerabilidad de los acuíferos costeros

El recurso hídrico es de vital importancia para las comunidades, el cual es indispensable para una digna calidad de vida de las personas, para lo cual es importante establecer parámetros de calidad, de esta forma, verificar la vulnerabilidad del agua subterránea, la cual será utilizada por los habitantes de las comunidades. Los acuíferos son de gran recurso para sectores donde el agua no es correctamente gestionada por las autoridades competentes, y la obtención es mediante la perforación de pozos. Por ello es importante que los seres humanos tomen conciencia en cuidar los terrenos y realizar perforaciones en lugares idóneos para extracción del líquido vital. Sin embargo, hay ciertos factores a considerar, por ejemplo, se no se debería realizar una perforación donde hayan existido plantaciones agrícolas, ya que se aplican fungicidas, pesticidas; por lo tanto, podría existir un elevado grado de vulnerabilidad y el agua no sería apta para el consumo humano.

La vulnerabilidad de los acuíferos ha sido estudiada durante el siglo XX contándose con variadas metodologías (Aller et al., 1987; Martínez et al., 1998; Carrión Mero et al., 2021).

Margat (1968), introdujo el término “vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación”. Estima la vulnerabilidad como una prioridad para el medio, es decir las capas de la corteza terrestre, el tipo de suelos; ya sean estos: arcillosos, arenosos, francos; los cuales permiten la infiltración en mencionados acuíferos y el grado de confianza según el tipo de terreno para poder realizar un estudio de vulnerabilidad del acuífero para el consumo diario de los habitantes.

“La evaluación de la vulnerabilidad es un proceso en el cual se combina la valoración de muchas características del sistema acuífero para producir un mapa en el que se diferencian áreas de mayor y menor vulnerabilidad” (Rueda & Betancur, 2006, p. 56). Foster et al. (2002), nos indica las clases de vulnerabilidad:

Tabla 1: Clases de vulnerabilidad.

Clase	Detalle
Vulnerabilidad extrema	El acuífero es vulnerable a la mayoría de los contaminantes con impacto rápido.
Vulnerabilidad alta	El acuífero es vulnerable a muchos contaminantes excepto a los que son frecuentemente absorbidos o fácilmente transformados.
Vulnerabilidad media o moderada	El acuífero es vulnerable a contaminantes que son continuamente descargados o lixiviados.
Vulnerabilidad baja	El acuífero es vulnerable solo a contaminantes conservativos cuando son descargados o lixiviados en forma amplia y continua durante largos periodos de tiempo
Vulnerabilidad despreciable	El acuífero es vulnerable a la percolación, pero es insignificante.

Fuente: Foster et al. (2002); Rueda & Betancur (2006).

La vulnerabilidad de las aguas subterráneas frente a la contaminación ya sea por derivados de petróleo, pastoreo de animales, uso de plaguicidas agrícolas, es una contaminación intrínseca del medio natural (suelo, clima y acuífero), lo cual al ser examinados. Se puede determinar la afectación por un agente externo que está en la superficie del suelo causando vulnerabilidad del acuífero costero. Según Carbonell (1993), menciona que la vulnerabilidad debido a la contaminación del agua subterránea es debido al efecto de los contaminantes que están ubicados en el sistema de los acuíferos.

Las circunstancias que implica en la vulnerabilidad de los acuíferos dependen a la vez de la antigüedad sobre explotación de este, y se recomienda realizar pozos subterráneos para el uso del agua domestica: lejos de peligros de contaminación de suelos como: lavaderos de ropa, desechos de basura, uso de plaguicidas y

agentes que causen vulnerabilidad a los acuíferos. Solo así se podrá preservar el acuífero y mantener la calidad de agua para el ser humano, así como posibles enfermedades. En algunos casos se ha detectado cáncer en la piel, por el agua contaminada y es usada para el uso diario, lo cual es perjudicial para el ser humano (Subsecretaría de Agua potable y saneamiento básico, 2003).

En los acuíferos costeros la intrusión salina es un factor muy relevante, donde la contaminación afecta a la calidad de los acuíferos, estos a su vez provocan la salubridad de los acuíferos costeros, provocando un grave problema con los habitantes con el proceso de la contaminación, ya que el recurso hídrico es usado diariamente para el consumo humano. Existen varias formas de contaminación de los pozos de agua subterránea, entre los cuales puede ser mediante la infiltración, pérdidas de masas de agua, intrusión de agua salina, provocando vulnerabilidad de los acuíferos (Hispagua-Sistema Español de Información sobre el Agua, 2017).

2.1.4. El método DRASTIC

Desde finales de los años 80 se ha dado a conocer el método DRASTIC, que es un modelo desarrollado por Aller et al. (1987), realizado para estimar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos en el Environmental Protection Agency (EPA-Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos). Actualmente, es el método más utilizado para diseñar mapas de vulnerabilidad, ya que se enfatiza en siete parámetros específicos, los cuales representan un impacto y relación en un determinado acuífero. Los parámetros se basan en información geológica, topográfica e hidrogeológica.

A cada parámetro se le asigna un rango (ver figura 1) y un peso según su influencia (ver tabla 2) en la vulnerabilidad del acuífero, y son valores fijos, ya establecidos por el método. La valoración para el peso comienza del 1 al 5, y los rangos se estiman del 1 al 10 según las condiciones de cada acuífero. Posteriormente se multiplica el parámetro por su peso y se suma la multiplicación de los parámetros por el rango, y de la misma forma con todos los parámetros, la expresión matemática se observa la Ecuación 1.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{DRASTIC} = & (D_r \times D_w) + (R_r \times R_w) + (A_r \times A_w) + (S_r \times S_w) + (T_r \times T_w) \\
 & + (I_r \times I_w) + (C_r \times C_w)
 \end{aligned}
 \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

r: representa un valor dentro de un rango determinado de cada parámetro.

W: representa un valor que es considerado el peso del parámetro y no varía.

D: Depth; Nivel al que se encuentra el agua subterránea.

R: Recharge; Recarga neta del acuífero.

A: Aquifer; Litología del acuífero.

S: Soil; Tipo de suelo.

T: Topography; Pendiente de la zona de estudio.

I: Impact; Naturaleza de la zona no saturada, o zona vadosa

C: Hydraulic conductivity; Conductividad hidráulica presente en todo el acuífero

Tabla 2: Pesos de los parámetros del método DRASTIC.

PARÁMETROS		PESO= w
D	Profundidad	5
R	Recarga	4
A	Naturaleza del acuífero	3
S	Tipo de suelo	2
T	Topografía	1
I	Naturaleza de la zona no saturada	5
C	Conductividad	3

Fuente: modificado de Aller et al. (1987).

(D) PROFUNDIDAD DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO		(R) RECARGA NETA	
RANGO (m)	VALOR	RANGO(mm)	VALOR
< 1,5	10	0-50	1
1,5-5	9	50-100	3
5-10	7	100-180	6
10-20	5	180-255	8
20-30	2	>255	9
>30	1		

(A) NATURALEZA DEL ACUÍFERO			(S) NATURALEZA DEL SUELO	
DESCRIPCIÓN	RANGO	VALOR	TIPO DE SUELO	VALOR
A-Arcillas, margas, limos	1-3	2	Arcilla no expansiva y agregada	1
B-Ígneas/metamórficas	2-5	3	Suelo orgánico	2
C-Ígneas/metamórficas alteradas	3-5	4	Marga arcillosa	3
D-Alternancia de areniscas, arcillas y calizas	5-9	6	Marga limosa	4
E-Areniscas masivas	4-9	6	Marga	5
F-Calizas masivas	4-9	6	Marga arenosa	6
G-Arenas, gravas y conglomerados	4-9	8	Arcilla expansiva y/o agregada	7
H-Volcánicas	2-10	9	Turba	8
I-Calizas carstificadas	9-10	10	Arena	9
			Grava	10
			Delgado o ausente	10

(T) TOPOGRAFÍA		(C) PERMEABILIDAD	
RANGO %	VALOR	RANGO (m/día)	VALOR
0- 2	10	<4	1
2- 6	9	4-12	2
6-12	5	12-28	4
12-18	3	28-40	6
> 18	1	40-80	8
		>80	10

(I) IMPACTO DE LA ZONA NO SATURADA		
DESCRIPCIÓN	RANGO	VALOR
A-Arcilla, limo, margas	1-2	1
B-Esquistos, pizarras	2-5	3
C-Calizas	2-7	6
D-Areniscas	4-8	6
E-Alternancia de calizas, areniscas y arcillas	4-8	6
F-Arenas y gravas con contenido en arcilla	4-8	6
G-Metamórficas, ígneas	2-8	4
H-Arenas y gravas	6-9	8
I-Volcánicas	2-10	9
J-Calizas carstificadas	8-10	10

Tabla 1. Rangos y valores de los parámetros (modificado de Aller et Al., 1987 en CCE-MOPTMA, 1994).

PARÁMETROS	ÍNDICE DE PONDERACIÓN (w)
D - Profundidad del nivel de agua	5
R - Recarga	4
A - Naturaleza del acuífero	3
S - Tipo de suelo	2
T - Topografía	1
I - Impacto de la zona no saturada	5
C - Permeabilidad	3

Figura 1: Rangos y ponderación por parámetros del modelo DRASTIC.

Fuentes: Martínez et al. (1998), modificado de Aller et. al. (1987).

Tabla 3: Descripción de los parámetros del método DRASTIC.

PARÁMETROS		Descripción
D	Profundidad	considera la profundidad del nivel piezométrico en el caso de un acuífero libre o del techo del acuífero para uno confinado. La vulnerabilidad disminuye con la profundidad. En su valoración pueden emplearse datos de puntos de agua, estudios hidrogeológicos y medidas de campo,
R	Recarga	Considera la recarga anual, se puede determinar por métodos convencionales de balance y en general se puede emplear la documentación existente cuando las áreas estudiadas afectan a Unidades Hidrogeológicas o acuíferos definidos.
A	Naturaleza del acuífero (litología)	Valora la litología que constituye el acuífero, considerándose que a mayor granulometría y fracturación, mayor permeabilidad y por tanto un grado de vulnerabilidad más elevado. Cuando existen varios acuíferos superpuestos siempre se valorará el superior. Para su determinación se emplea la cartografía geológica existente, como paso previo a un reconocimiento de campo de las litologías de los tramos peor definidos.
S	Tipo de suelo	Se considera la porción alterada del suelo que soporta la actividad biológica. Este parámetro se valorará de forma distinta si la obra es superficial o enterrada, ya que para el segundo caso, y dependiendo de la profundidad a la que se halle, se debe considerar suelo delgado o ausente, ya que queda excluido todo efecto de atenuación de la vulnerabilidad por parte de éste.
T	Topografía	Consiste en el levantamiento topográfico, que puede emplearse para la estimación de las pendientes correspondientes.
I	Naturaleza de la zona no saturada	Contempla la existencia de acuíferos libres confinados y semiconfinados al valorar el tipo de materiales existentes en la zona no saturada. Si el acuífero es libre corresponde a la propia litología del acuífero y para los otros dos casos corresponde a los materiales suprayacentes confinantes.
C	Conductividad hidráulica o permeabilidad	Valores teóricos relativos estimados para las diferentes litologías, estableciendo rangos en función de la propia litología, número de captaciones existentes, caudal explotado y otras observaciones realizadas en el campo.

Fuente: Martínez et al. (1998, pp. 417-418), modificado de Aller et al. (1987).

Para el caso de la conductividad hidráulica o permeabilidad se asumirá la modificación propuesta por Carrión Mero et al. (2021) y que se expresa en la siguiente tabla:

Tabla 4: Rango de valores para la conductividad hidráulica.

C	
Conductividad Hidráulica (m/día)	valor (r)
0.04 - 4.08	1
4.08 - 12.22	2
12.22 - 28.55	4

Fuente: Carrión Mero et al. (2021), modificado de Aller et al. (1987).

Para estimar el grado de vulnerabilidad del acuífero, se clasifican los rangos del índice obtenido mediante la clasificación empleada en la tabla 5, donde se muestran los rangos, y el color de cada grado para visualizar en el mapa final.

Tabla 5: Índices, rangos y grado de vulnerabilidad del modelo DRASTIC.

Índice	Grado de vulnerabilidad	Color
< 79	Despreciable	Violeta
88 - 99	Extremadamente baja	Azul oscuro
100 - 119	Baja	Azul claro
120 - 139	Media	Verde oscuro
140 - 159	Alta	Verde claro
160 - 179	Muy alta	Amarillo
180 - 199	Extremadamente alta	Anaranjado
> 200	Supremamente alta	Rojo

Fuente: modificado de Aller et al. (1987).

2.1.5. El método DRASTIC-LQ

DRASTIC-LQ es una propuesta de Carrión Mero et al. (2021). Una vez seleccionados los parámetros involucrados en el método convencional de DRASTIC, se procederá a incrementar dos parámetros adicionales, los cuales pueden estar presentes en distintos sistemas acuíferos, y se deberían tomar en cuenta en estudios relacionados con la vulnerabilidad. Estos son: la recarga lateral (L) y la influencia de una recarga zonificada, en este caso mediante un dique (Q), obteniendo el método DRASTIC-LQ.

Para la correcta aplicación de la metodología que se va a emplear, se asignará un peso (w) y rangos (r), para los nuevos parámetros. La recarga lateral, o también conocida como recarga de borde, representa una parte significativa en el aporte del agua subterránea, que se origina mediante la escorrentía en las precipitaciones, especialmente en los meses de lluvia. Tomando en cuenta que el método convencional ya considera una recarga, al sumar este nuevo parámetro se le ha asignará un peso (w), para indicar que se ha considerado esta fuente. Los rangos para el parámetro $L(r)$, dependerán de la temporada que se está analizando. Se considerará que, independientemente del año, si el análisis es en temporada de lluvia (si hay escorrentía), y si es en temporada seca (no existe escorrentía superficial).

El dique es considerado debido a su importante aplicación en la recarga superficial del acuífero, el cual puede influir en su contaminación, ya que se encarga de almacenar el agua y mantener su permanencia durante más tiempo, que a su vez es un beneficio, ya que logra acaparar el agua en temporada seca. Para la asignación de los rangos $Q(r)$, se establecerá una relación entre el nivel de agua en temporada de lluvia y el nivel en temporada seca de un mismo año. Para ello, se restan estos dos niveles, y esa diferencia, indicará la aportación del dique en la recarga superficial.

Una vez seleccionado los rangos de cada parámetro, se procede a la creación de capas mediante el software ArcGis 10.5. Se utilizará la geometría de la zona de

estudio (acuífero Manglaralto), y se le asignará el valor correspondiente a cada parámetro. Esto se lo realizará con la herramienta Reclassify de dicho software.

Es importante señalar, que varias capas que se van a mantener constantes para el cálculo de la vulnerabilidad en cualquier año o temporada (húmeda o seca), debido a que dependen de las características de la zona de estudio, lo cual no va a variar. Estas capas serán denominadas como “generales”, las cuales son: Naturaleza del acuífero, tipo de suelo, pendiente, naturaleza de la zona vadosa, y conductividad hidráulica.

Por otro lado, se tomará en cuenta otro tipo de capas, las cuales dependerán de las condiciones climatológicas de cada año, estas son: la recarga y el dique. También se consideran capas según la temporada específica en cada año, la cual está representada por el nivel del agua y recarga lateral.

2.2. Antecedentes de la investigación

7.2.1. Antecedentes internacionales

Worthington et al. (2017), evaluaron las diferencias entre acuíferos kársticos y aquellos de lecho de roca, con base en la presencia de “redes de canales de solución, conductividades hidráulicas $>10^{-6}$ m/s, paisajes kársticos, canales con flujo turbulento y cuevas” (Worthington et al. 2017, p. 1237). La tasa porcentual de acuíferos "kársticos" no confinados oscilaría entre <1 y $>50\%$. Esto posiciona a estos acuíferos como de los más frecuentes.

Mateos et al. (2017), evaluaron geológica e hidrogeológicamente los procesos de subsidencia detectados en el acuífero detrítico de la Vega de Granada (SE de España) durante los últimos 13 años. Se usaron imágenes SAR. Los resultados mostraron una deformación inelástica en el acuífero y pequeños desplazamientos de la superficie del terreno (hasta -55 mm). El hundimiento del terreno más extendido se detecta en el periodo 2003-2009, que coincidió con un periodo de sequía en la región. Se concluye que existe un claro control litológico en la

distribución espacial del hundimiento del suelo; todas las zonas de hundimiento detectadas se localizan donde se identificó un mayor contenido de arcilla. Aunque el sector SE del acuífero tuvo una explotación más intensa de las aguas subterráneas, no se detectaron procesos de subsidencia del terreno, ya que en el sustrato predominan los sedimentos de grano grueso. Esta investigación contribuirá a la elaboración de un plan de gestión para el uso sostenible de este acuífero estratégico, teniendo en cuenta los niveles críticos de agotamiento de las aguas subterráneas para evitar el hundimiento del terreno en las zonas identificadas como vulnerables.

Hoque et al. (2017) se centraron en estudiar las fuentes, la movilización y la heterogeneidad del arsénico (As) en las aguas subterráneas, pero sigue siendo difícil encontrar una explicación coherente de la distribución del As a escala local y de cuenca. Se demostró que las numerosas capas discontinuas de arcilla y limo, junto con la topografía de la superficie, imponen un patrón jerárquico de flujo de aguas subterráneas que limita la penetración del As en el acuífero y controla su redistribución hacia las zonas de descarga, donde se reabsorbe en fases sólidas. Esto es particularmente cierto en el caso de los periodos discretos de liberación de As a las aguas subterráneas en el subsuelo poco profundo, asociados a las condiciones de alto nivel del mar de los periodos interglaciares del Cuaternario. El análisis sugiere que el As de las aguas subterráneas puede persistir en los acuíferos de los deltas asiáticos a lo largo de miles de años, pero en ciertas regiones, especialmente en los niveles más profundos, el As no superará las bajas concentraciones de fondo a menos que los sistemas de flujo de las aguas subterráneas sufran un cortocircuito por un bombeo excesivo.

Asfaw & Mengistu (2020), modelaron la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero de la cuenca hidrográfica de Megech, utilizando el modelo DRASTIC modificado para la gestión sostenible de las aguas subterráneas, en el noroeste de Etiopía. Los resultados del análisis de vulnerabilidad revelan que más del 85% de las aguas subterráneas de la cuenca estudiada son de vulnerabilidad media a alta a la contaminación del agua. Los acuíferos altamente vulnerables a la contaminación (5,74%) se encuentran principalmente en las zonas urbanas,

mientras que la mayoría de los acuíferos (80,34%) que son moderadamente vulnerables se encuentran predominantemente en las tierras cultivadas. En la parte altamente vulnerable del acuífero, la concentración de nitrato (17/mg) y de coliformes totales (21/mg) superó el límite permitido por la OMS, lo que coincide con el mapa de vulnerabilidad. La gestión eficaz de los recursos hídricos subterráneos se ha convertido en una cuestión crítica. Por lo tanto, el estudio será útil para la correcta gestión y protección de los recursos hídricos subterráneos disponibles en la cuenca del estudio.

Barbulescu (2020), evaluaron la vulnerabilidad de las aguas subterráneas con métodos DRASTIC y similares, destacando las bondades de este método en comparación con otros en cuanto a la información que arroja para preservar la calidad del agua en general, o del acuífero kárstico, en particular.

Bera et al. (2021), evaluaron la vulnerabilidad de las aguas subterráneas mediante el modelo DRASTIC basado en SIG en la cuenca del río Nangasai, India, con especial énfasis en la contaminación agrícola. En el estudio se han tenido en cuenta un total de 7 parámetros hidrogeológicos, y el mapa final de vulnerabilidad de las aguas subterráneas se ha preparado mediante el método de superposición ponderada con la ayuda del índice DRASTIC, que se clasifica en 5 clases de vulnerabilidad (muy alta, alta, moderada, baja y muy baja). En las regiones del sur y del sureste de la cuenca, a saber, Deghi, Bankada, Baram, Macha, Katin y Tilabani, se ha observado una elevada contaminación de las aguas subterráneas. Para validar el modelo, se han utilizado los parámetros de calidad del agua -nitrato y TDS- con una precisión del 89% y el 86% respectivamente. Señalan que utilizando métodos eficaces y científicamente aprobados, la contaminación antropogénica y agrícola puede ser controlada y gestionada, lo que reducirá el riesgo de contaminación.

Giambastiani et al. (2021), analizaron la evolución de la salinidad y del nivel freático del acuífero costero freático de la región de Emilia Romagna (Italia). Analizaron estadísticamente los datos de las aguas subterráneas para evaluar los cambios espaciales del nivel del agua y la conductividad eléctrica en el acuífero freático

costero de la Emilia-Romaña (noreste de Italia) para el período comprendido entre 2009 y 2018. Se utilizaron datos de 35 pozos distribuidos por toda la zona costera regional para establecer una tendencia temporal, así como correlaciones entre la salinidad, el nivel freático y las precipitaciones. Se analizaron los mapas de distribución del nivel freático y de la salinidad de toda la zona de estudio en relación con la geología superficial y la gestión del agua. La mayoría de los pozos se encuentran en la unidad de arena de cuña de playa, lo que permite una fácil conectividad entre las aguas subterráneas y las superficiales. Destacan que la salinización de las aguas superficiales y subterráneas se potencia a lo largo de las masas de agua superficiales conectadas al mar. Encontraron que el nivel más bajo de la capa freática se da en las partes occidental y septentrional de la zona de estudio, debido al comportamiento semiconfinado del acuífero, y que sólo en la parte más septentrional, cerca del río Po, y en la más meridional de la zona de estudio, las aguas subterráneas se mantienen frescas durante todo el periodo considerado debido a la recarga del acuífero fluvial. En el resto de la región, el espesor de las lentes de agua dulce, cuando están presentes, es inferior a 4,5 m. La existencia de un nivel freático por debajo del nivel del mar y de un alto nivel de salinidad en el fondo del acuífero en la mayor parte de la zona de estudio sugiere que el acuífero se encontraba en condiciones hidrodinámicas inestables y que la calidad del agua subterránea no es apta para el consumo humano ni para el riego. El estudio es el primero en proporcionar una visión general regional del estado del nivel de las aguas subterráneas y la salinización dentro del acuífero costero de la región de Emilia-Romaña; también sugiere que, en general, la tendencia de salinización ha disminuido ligeramente desde 2009 hasta 2018.

7.2.2. Antecedentes nacionales

Herrera (2016), analizó un modelo de gestión sostenible de Manglaralto, Ecuador. Realizó un abordaje geoespacial donde se señala la influencia de la de los cambios, los aspectos técnicos y el aprovechamiento del acuífero costero, con respecto a los habitantes del territorio, el abastecimiento de agua y el desarrollo local sostenible. La tesis analizó la influencia de 9 pozos que suministran agua las 24 horas al día de forma ininterrumpida.

Morante et al. (2019), estudiaron la correlación hidroquímica y geológica para establecer la salinidad del agua subterránea del acuífero costero de la cuenca del río Manglaralto, Ecuador. Caracterizaron las aguas del sistema hidrogeológico mediante técnicas hidroquímicas (diagramas de Piper y Stiff) y su correlación con la geología de la zona, así como la determinación de la intrusión marina. La metodología utilizada se basa en las concentraciones de los principales iones, que se han obtenido por la interacción agua-roca, donde el análisis geológico ayuda a comprender el modelo hidrogeológico conceptual. Los resultados obtenidos indican que existen dos grupos de aguas: en la parte más cercana al interior de la cuenca con facies principalmente bicarbonatadas y cálcico-sódicas, mientras que la más cercana al mar muestra facies cálcicas marcadamente calcificadas, y la existencia de intrusión marina en el pozo más cercano a la línea de costa.

Loor et al. (2019), analizaron la vulnerabilidad de los acuíferos ante la percolación de agroquímicos en el cantón Gral. Antonio Elizalde (Bucay). Se evaluaron las condiciones intrínsecas y morfológicas del acuífero y se estudiaron los efectos por la percolación de agroquímicos, provenientes de actividades agrícolas, utilizándose el método DRASTIC. Los resultados indican una alta vulnerabilidad y la necesidad de implantar políticas y buenas prácticas en el agro y la preservación del acuífero, ante la alta vulnerabilidad calculada.

Carrión Mero et al. (2021), establecieron un “modelo numérico de flujo y transporte de un acuífero costero basado en la importancia hidráulica de un dique y su impacto en la calidad del agua: Manglaralto-Ecuador”. Se utilizó información hidrogeológica junto al software “Visual Transin”, asociando el factor hidráulico del dique (“cinta”) y su efecto en la calidad del agua. La metodología consiste en “(i) el análisis de la base de datos hidrogeológica, (ii) la recarga del sistema en relación con el balance hídrico del suelo, (iii) las condiciones de contorno del modelo de flujo y transporte y, (iv) los resultados y la validación de la simulación numérica” (Carrión Mero et al., 2021, p. 443). Los resultados destacan la importancia específica la recarga artificial del sector impactando en el aumento del nivel piezométrico y el descenso de la salinidad en los pozos costeros. El modelo de flujo y de transporte es útil para evaluar la oscilación de los niveles piezométricos

y las concentraciones de TDS en el tiempo, así como el factor recarga en el funcionamiento del sistema hidrogeológico.

Durango-Cordero et al. (2022), hicieron una evaluación del riesgo de fosas petrolíferas sin revestimiento que se filtran a las aguas subterráneas en la Amazonia ecuatoriana mediante la integración SIG-DRASTIC modificado. Se aplicó un análisis espacial, construyendo mapas para la integración en la planificación del uso de la tierra, la mejora de la salud pública y las futuras investigaciones de sitios específicos. Los resultados indican que un 83% de la zona representa una vulnerabilidad baja o media-baja. “Este estudio dio lugar a varias recomendaciones, como el nivel de idoneidad de la información disponible, y las lagunas que deberían cubrirse para mejorar las investigaciones futuras. Debería darse prioridad a una superficie de 271-766,5 km en el rango de distancia de 500-2000 m para una evaluación de riesgos a escala más fina” (Durango-Cordero et al. 2022, p. 102628).

CAPÍTULO III

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Tipo de Estudio

El estudio es cuantitativo correspondiéndose a un investigación aplicada (Concytec, 2018) al campo de las ciencias ambientales y la tecnología (García, 2009). El diseño fue “no experimental” (Cegarra, 2004; García, 2009), donde no se preestablece el control sobre los parámetros seleccionados (Hernández et al., 2014). El nivel fue “descriptivo-explicativo” (Hernández et al, 2014). Por último se declara que es una investigación en el campo de la Ingeniería (Casaño, 2016).

3.1.1. Diseño de contrastación de hipótesis

A continuación se presenta el contraste de hipótesis para determinar: a) Diferenciación estacional de los índices de vulnerabilidad; b) Diferenciación estacional de los índices de vulnerabilidad. Se empleó para tal fin test de comparación no paramétrico de rangos con signo de **Wilcoxon** entre los índices de vulnerabilidad DRASTIC y DRASTIC-LQ.

Contraste de hipótesis

Diferenciación estacional de los índices de vulnerabilidad:

H₀: Los índices de vulnerabilidad del acuífero costero Manglaralto resultantes de la aplicación los métodos DRASTIC (**Variable X₁**) y DRASTIC-LQ (**Variable X₂**) no se diferencian significativamente.

H₁: Los índices de vulnerabilidad del acuífero costero Manglaralto resultantes de la aplicación los métodos DRASTIC (**Variable X₁**) y DRASTIC-LQ (**Variable X₂**) si se diferencian significativamente, y arrojan diferencias en cuanto al grado de vulnerabilidad general del acuífero.

Diferenciación estacional de los índices de vulnerabilidad:

H₀: Los índices de vulnerabilidad **estacional** del acuífero costero Manglaralto resultantes de la aplicación los métodos DRASTIC (**Variable X₁**) y DRASTIC-LQ (**Variable X₂**) no se diferencian significativamente.

H₁: Los índices de vulnerabilidad **estacional** del acuífero costero Manglaralto resultantes de la aplicación los métodos DRASTIC (**Variable X₁**) y DRASTIC-LQ (**Variable X₂**) si se diferencian significativamente, y arrojan diferencias en cuanto al grado de vulnerabilidad general del acuífero.

Nivel de confianza de las pruebas: 95%; α : 0.05. Para todo $\alpha \leq 0.05$ se rechaza **H₀**.

3.2. Población, Muestra y Muestreo

Por ser un estudio realizado en ciencias ambientales y de la Ingeniería, donde se realizan ensayos de laboratorio y es necesaria la recolección temporal de (series cronológicas estacionales o mensuales), la población de datos es considerada *infinita* (Casaño, 2016). Esto se debe a que mientras permanezca la fuente ambiental, será posible obtener nuevas muestras con potencial de análisis.

Se seleccionaron 10 pozos (ver figura 1) distribuidos en el acuífero costero de Manglaralto debidamente georeferenciados para poder posicionar su ubicación en un mapa (ver figura 1).

El muestreo fue estacional considerando los dos periodos pluviométricos del Ecuador, es decir, en temporada de lluvia, teniendo como mes referencial a febrero y en temporada seca al mes de julio. El muestreo consideró mediciones de la vulnerabilidad entre 2019 y 2021.

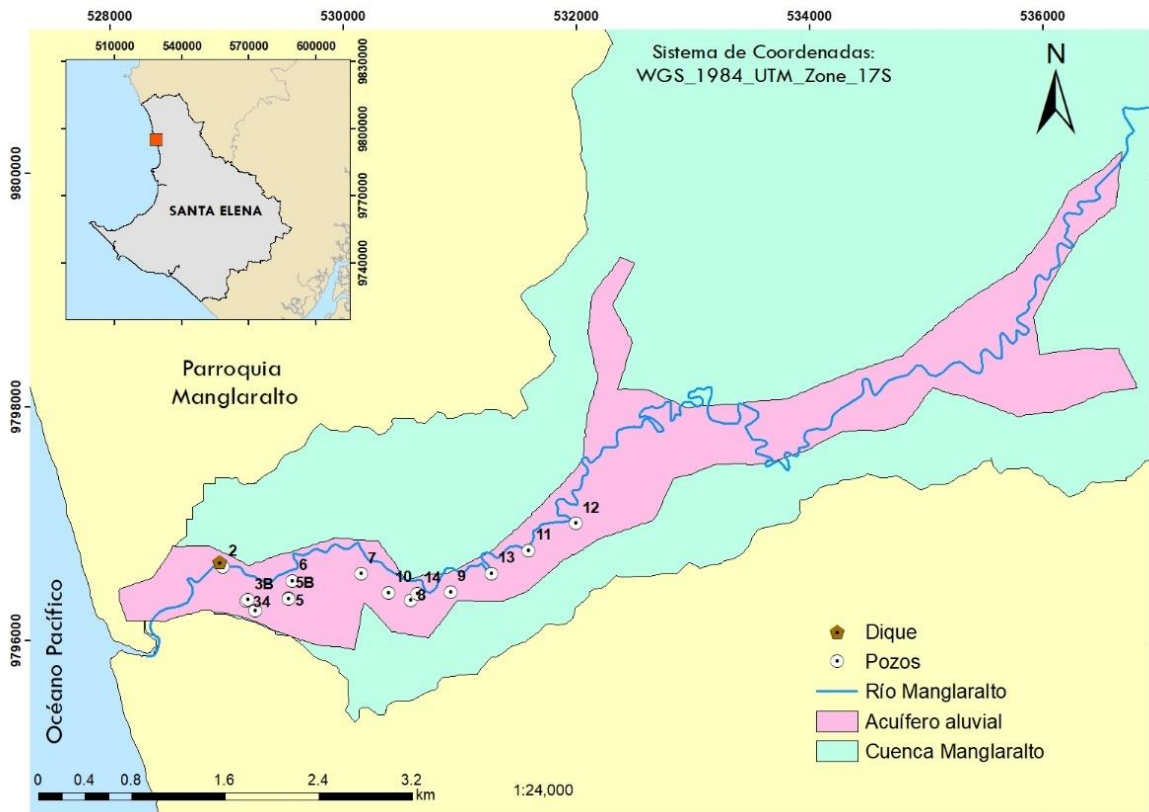


Figura 2: Mapa de Ubicación de los pozos y dique en la zona de estudio.

3.3. Métodos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Se aplicó el método hipotético-deductivo propio de trabajos cuantitativos (Cegarra, 2004), partiéndose de hipótesis que serán contrastadas estadísticamente (García, 2009).

La técnica de recolección de información fue la observación y los instrumentos fueron las fichas de observación ajustadas a los parámetros descritos en el anexo 1 (“cuadro de variables”). Las fichas se presentan en el anexo 2. Las mismas se

consideran válidas y confiables habiendo sido utilizadas en distintos informes técnicos y publicaciones (Martínez et al., 1998; Carrión Mero et al., 2021).

3.4. Plan de procesamiento y análisis de datos

Para llevar a cabo la presente investigación, se consideró el siguiente esquema metodológico (figura 2):

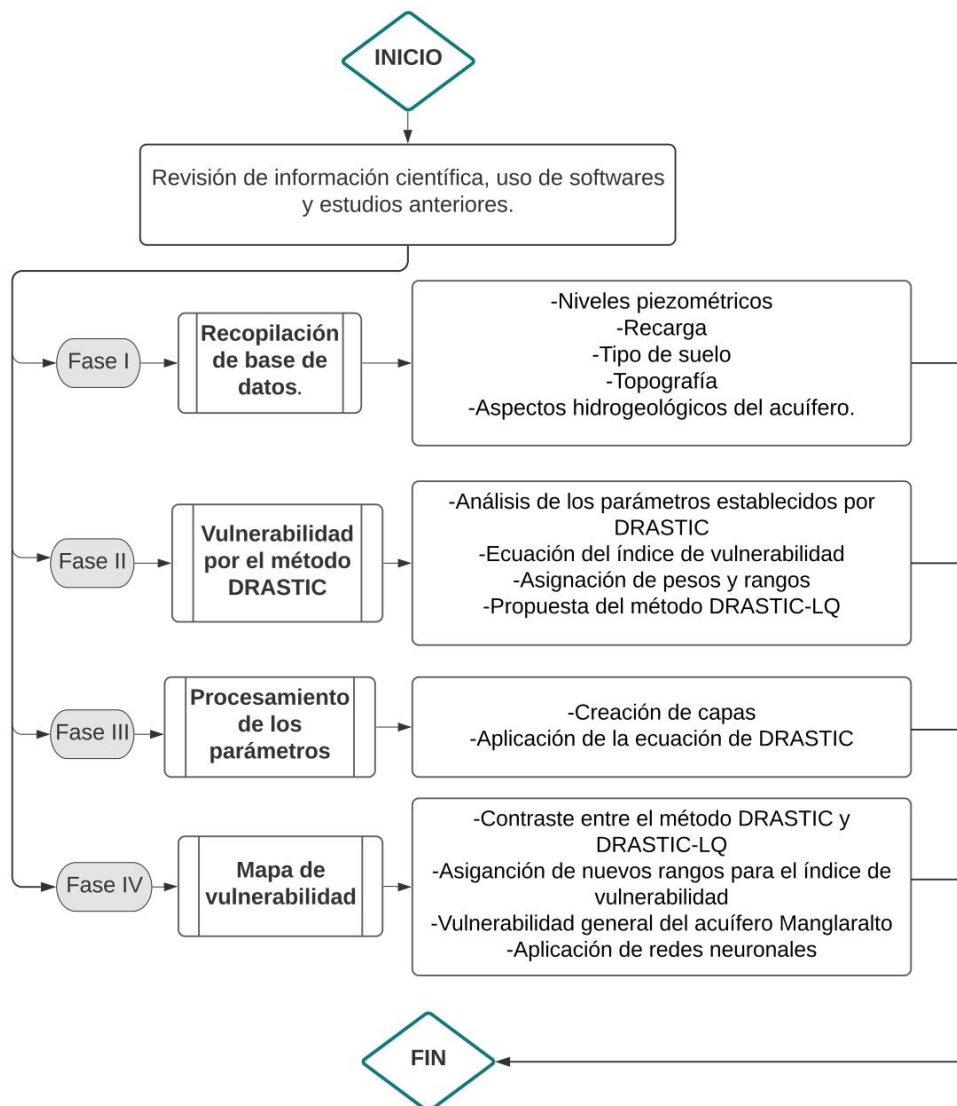


Figura 3: Fases de la investigación.

3.4.1. Recopilación de base de datos

Para el presente estudio, se consideró información desde el año 2019 hasta el 2021. La base de datos obtenida estuvo constituida por:

- a. Niveles piezométricos de los pozos, los cuales son monitoreados mensualmente por la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), y miembros de la Junta Administradora de Agua Potable Regional Manglaralto (JAAPMAN).
- b. La recarga del acuífero del 2019, 2020, y 2021, fue calculada con el software *Easy Balance*, con base en las precipitaciones y temperaturas proporcionadas por la web y base de datos de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NOAA).
- c. La conductividad hidráulica fue determinada por el método electrométrico validado en la zona por Carrión-Mero et al. (2021).
- d. El tipo de suelo se identificó mediante salidas de campo y ensayos en laboratorio a partir de la fracción textural.
- e. La topografía y pendiente de la zona de estudio fue obtenida mediante procesamiento de imágenes satelitales procesadas con el software ArcGis 10.5.
- f. La geología de la zona vadosa y del acuífero, se identificó mediante la integración de mapas geológicos y perforaciones *in situ*.

3.4.2. Procesamiento y análisis de la información

Fase de análisis descriptivo

Vulnerabilidad por los métodos DRASTIC y DRASTIC-LQ

En esta fase se realizó el cálculo del DRASTIC vulnerability index para la serie temporal (meses de febrero y junio) para lo cual será necesario contar con la valoración de cada parámetro del modelo.

De igual forma se realizó el cálculo del DRASTIC-LQ vulnerability index para los mismos meses, solo que añadiendo los parámetros de recarga lateral (L) y la influencia de una recarga zonificada, en este caso mediante un dique (Q).

3.4.3. Procesamiento gráfico de los parámetros

Una vez seleccionado los rangos de cada parámetro, se procedió a la creación de capas mediante el software ArcGis 10.5. Se consideró tomar la geometría de la zona de estudio (acuífero Manglaralto), y calificar las capas con el respectivo valor del rango escogido. Para esto se usó la herramienta Reclassify de dicho software.

3.4.4. Fase de contraste de hipótesis y de informe final

Para obtener las diferencias significativas entre las mediciones de los pozos de muestreo con base en los de los índices DRASTIC y DRASTIC-LQ se procedió a realizar el contraste de hipótesis ("Test de rangos con signos de Wilcoxon"). Se empleó el software SPSS 26 para los cálculos y tomar las decisiones con base en el p-valor. En la sección 3.1.2 se describen las hipótesis contrastadas. Por último se redactó el informe final de tesis de acuerdo a las directivas de investigación.

CAPITULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

4.1.1. Vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas del acuífero costero Manglaralto mediante el método DRASTIC

Los mapas de vulnerabilidad se obtuvieron mediante el uso del software ArcGis 10.5, donde se empleó la herramienta “Algebra de mapas”. Para ello, fue necesario elaborar capas de tipo ráster de cada parámetro. Debido a que la herramienta mencionada aplica “raster calculator”, para obtener el resultado deseado.

4.1.2. Vulnerabilidad estacional del acuífero para el año 2019

Temporada de lluvia 2019 (Mes referencial: Febrero)

En el año 2019, en la temporada de lluvia, se tienen índices DRASTIC de grados de vulnerabilidad que varían entre 114 (baja) y 155 (alta). El sector más vulnerable se encuentra en la zona media del acuífero, y en los alrededores del borde costero (pozos 2, 3 y 4). En la zona media se distingue una vulnerabilidad media (pozos 5, 6 y 7), exhibiendo los demás pozos una vulnerabilidad baja (ver figura 4).

Temporada seca 2019 (Mes referencial: julio)

Durante la temporada seca, se tienen índices DRASTIC donde están ausentes la categorización de vulnerabilidad alta. Las zonas marcadas como de vulnerabilidad alta en la temporada lluviosa exhiben una condición de vulnerabilidad media en el

borde costero (pozos 2, 3 y 4). En la zona media del acuífero, y en los alrededores del borde costero (pozos 2, 3 y 4). En la zona media se distingue una vulnerabilidad media (pozos 5, 6 y 7), exhibiendo los demás pozos una vulnerabilidad baja. Esto evidencia una variación estacional de la vulnerabilidad según el criterio DRASTIC (ver figura 5).

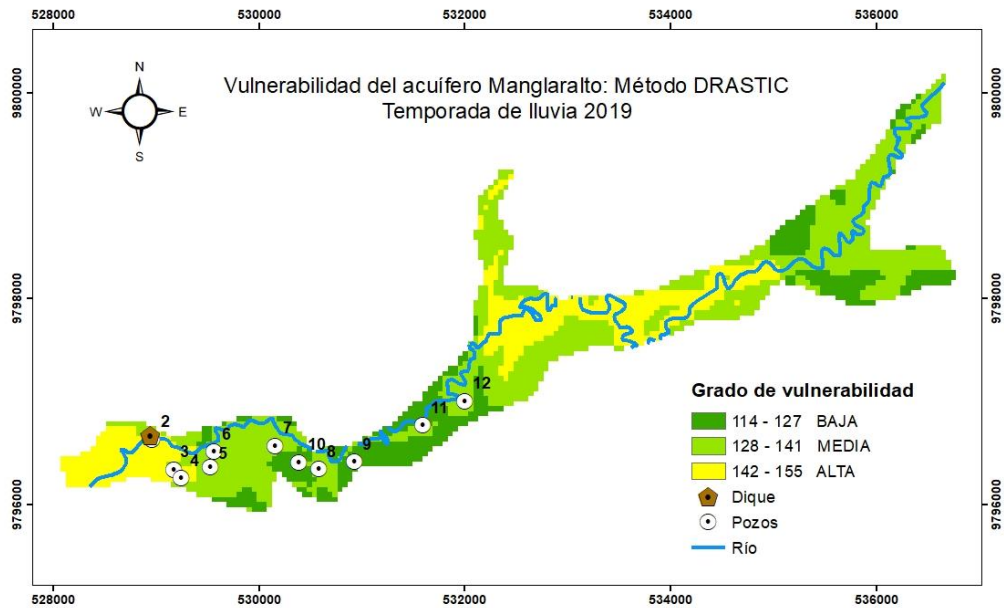


Figura 4: Método DRASTIC: Mapa de vulnerabilidad (febrero 2019).

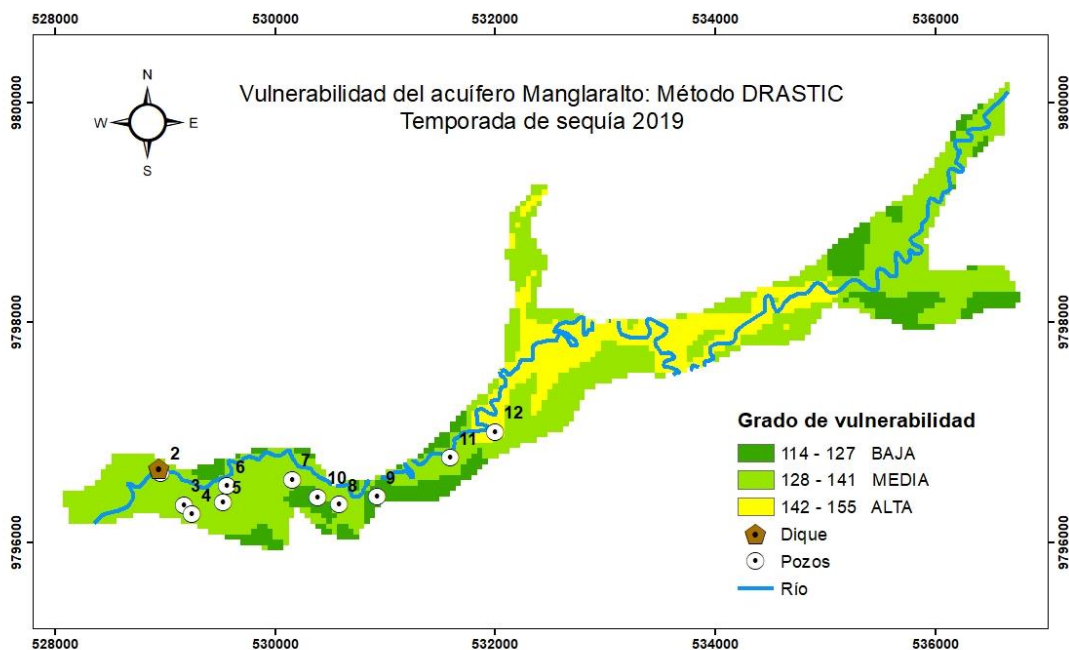


Figura 5: Método DRASTIC: Mapa de vulnerabilidad (julio 2019).

Temporada de Lluvia 2020 (Mes referencial: Febrero)

En el año 2020, en la temporada de lluvia, se observa una variación con respecto al año anterior. Se refleja una condición de vulnerabilidad similar al de la temporada seca del 2019. Se tienen índices DRASTIC de grados de vulnerabilidad que varían entre 114 (baja) y 155 (alta). Sin embargo, el sector de vulnerabilidad media se extiende casi a todo lo largo del acuífero. Solo el pozo 12 muestra una vulnerabilidad alta (ver figura 6).

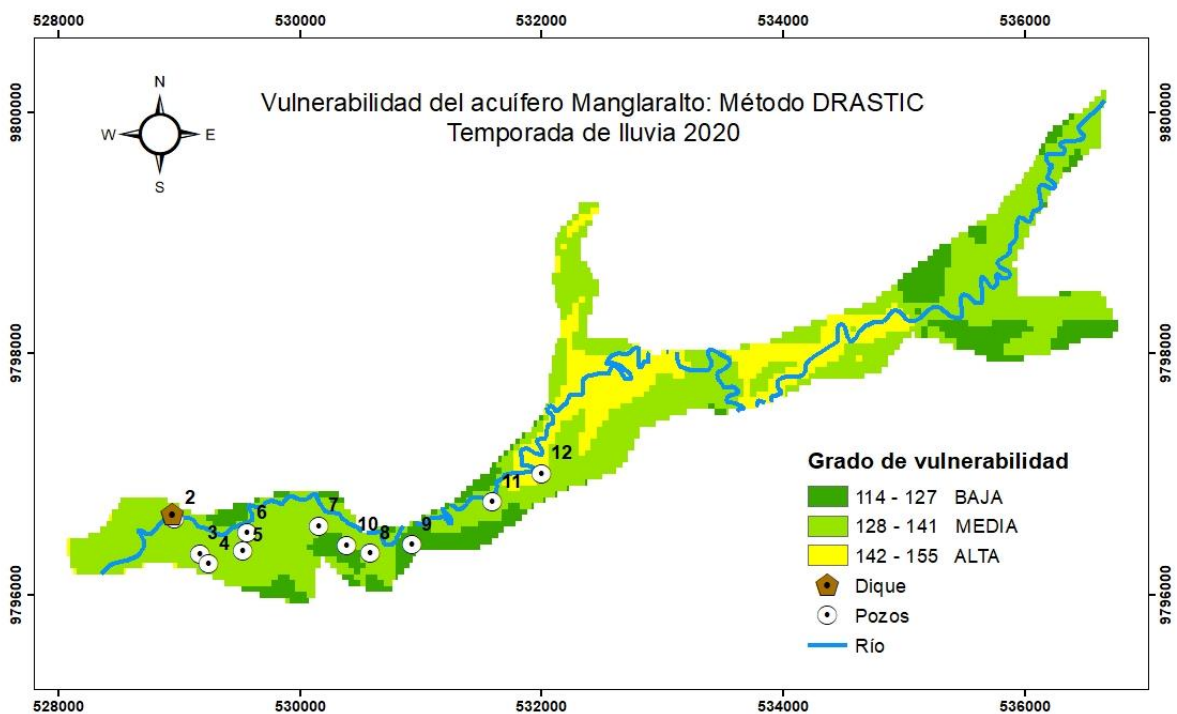


Figura 6: Mapa de vulnerabilidad. Método DRASTIC (febrero 2020).

Temporada seca 2020 (Mes referencial: julio)

En la temporada seca de 2020, se aprecia al igual que en 2019, una variación caracterizada por una baja en la vulnerabilidad. En líneas generales, se refleja una condición de vulnerabilidad similar al de la temporada seca del 2019. Se tienen índices DRASTIC de grados de vulnerabilidad que varían entre 114 (baja) y 155 (alta). Los pozos 5 y 6 presentan vulnerabilidad baja en contraposición a lo observado en la temporada lluviosa (vulnerabilidad media), al igual que los pozos 9

y 10. El pozo 12 que mostraba una vulnerabilidad alta durante las lluvias pasa a exhibir una vulnerabilidad media (ver figura 7).

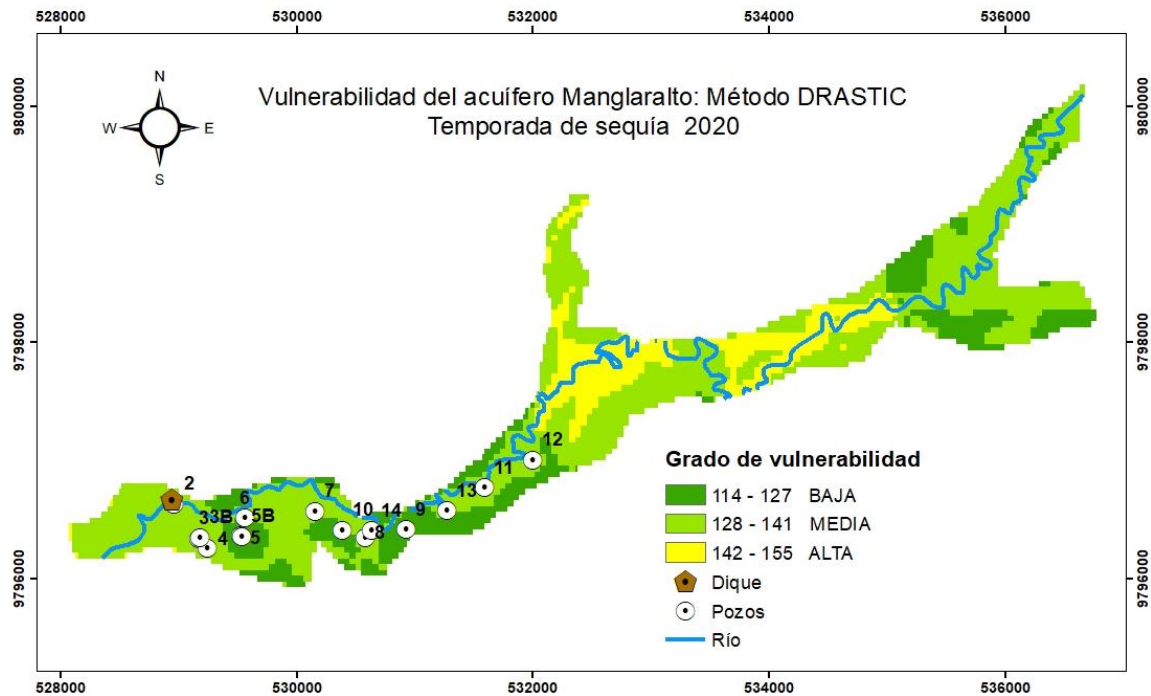


Figura 7: Método DRASTIC: Mapa de vulnerabilidad (julio 2020).

4.1.3. Vulnerabilidad estacional del acuífero para el año 2021

Temporada de lluvia 2021 (Mes referencial: Febrero)

En el año 2021, en la temporada de lluvia, se observa una variación sustancial con respecto a los años anteriores. La vulnerabilidad en todo el acuífero supera el umbral de 142 (alta) para alcanzar valores de muy alta en el sector costero y noroccidental del mismo (Pozos, 2, 11, 12 y 13). Los demás pozos exhiben condición de vulnerabilidad alta (ver figura 8).

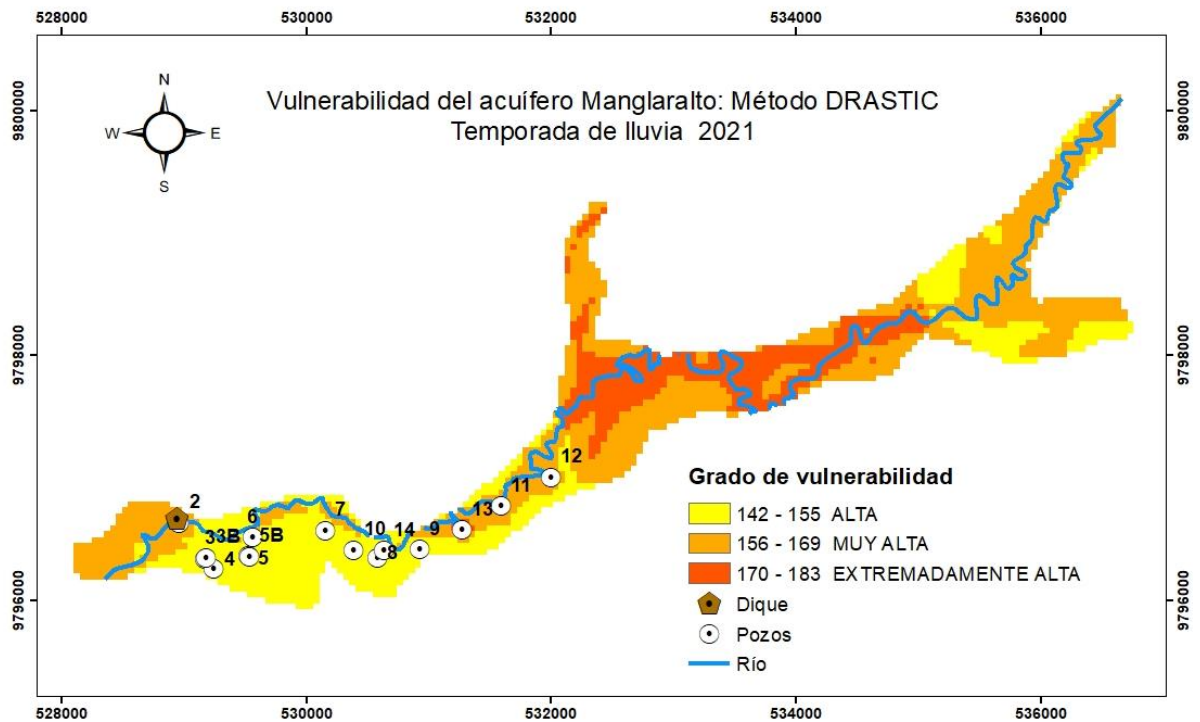


Figura 8: Método DRASTIC: Mapa de vulnerabilidad (febrero 2021).

T

emporada seca 2021 (Mes referencial: julio)

En la temporada seca, se observa también una variación sustancial con respecto a los años anteriores. La vulnerabilidad en todo el acuífero superó el umbral de 142 (alta) para alcanzar valores de muy alta en el sector costero y noroccidental del mismo (Pozos, 2, 5, 12 y 13). Los demás pozos exhiben condición de vulnerabilidad alta. De esta forma, se aprecian condiciones particulares para este año en comparación con los anteriores (ver figura 9).

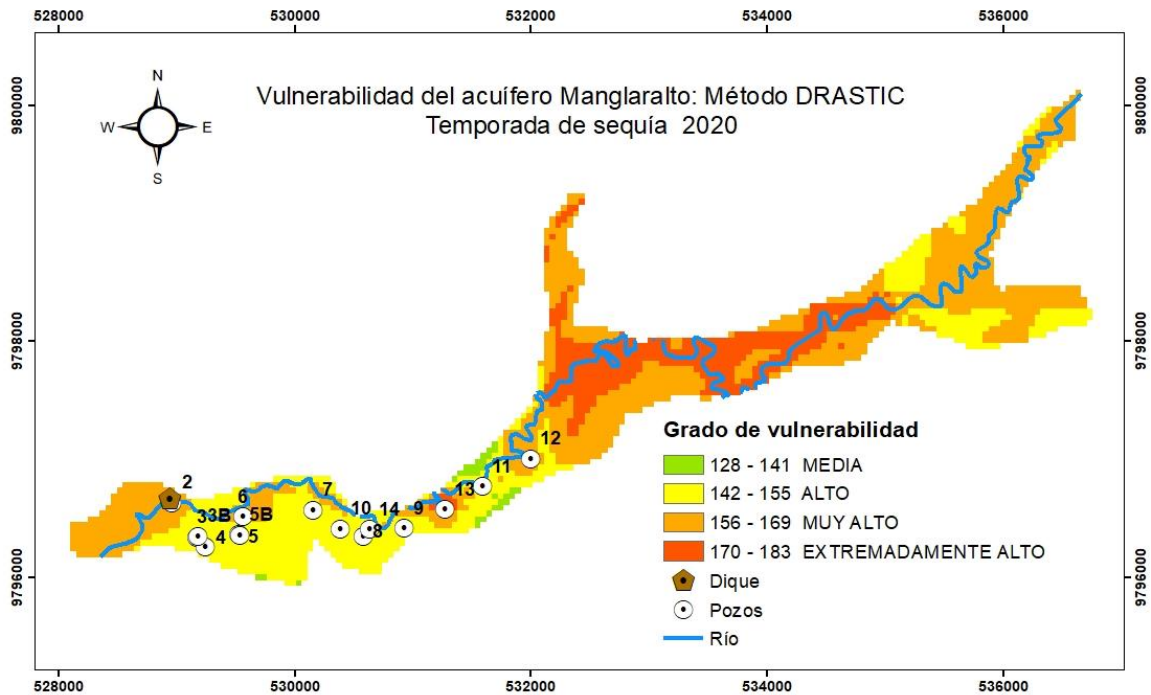


Figura 9: Método DRASTIC: Mapa de vulnerabilidad (julio 2021).

4.1.4. Vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas del acuífero costero Manglaralto mediante el método DRASTIC-LQ

Vulnerabilidad estacional del acuífero para el año 2019

Temporada de lluvia 2019 (Mes referencial: Febrero)

Se evidencia que aplicando el método DRASTIC-LQ aumenta la vulnerabilidad en las áreas marcadas por DRASTIC donde inicialmente se marcaban franjas de vulnerabilidad baja en el sector costero (pozos 2, 3 y 4) (figura 4). En la parte baja y alta del acuífero, solo se aprecia el color verde oscuro y verde claro, indicando grado bajo y medio de vulnerabilidad respectivamente, manteniéndose la misma apreciación que con DRASTIC.

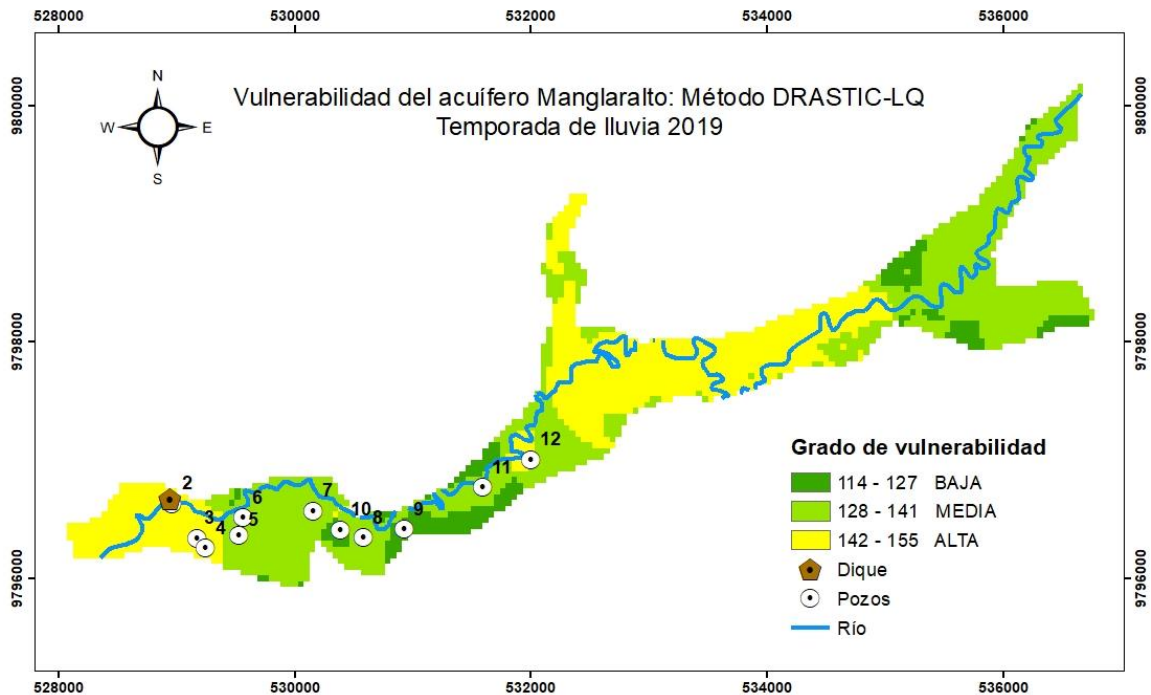


Figura 10: Método DRASTIC-LQ: Mapa de vulnerabilidad (febrero 2019).

Temporada seca 2019 (Mes referencial: julio)

Durante la temporada seca, se tienen índices de DRASTIC-LQ similares a los de DRASTIC en la zona costera y franja media donde están ausentes la categorización de vulnerabilidad alta, prevaleciendo la vulnerabilidad media. Las zonas marcadas como de vulnerabilidad baja y media en la temporada lluviosa (sector nororiental) exhiben ahora una condición de vulnerabilidad alta (pozos 11 y 12). Esto evidencia una variación estacional de la vulnerabilidad en el sector nororiental donde el criterio DRASTIC-LQ resulta con mayor sensibilidad (ver figuras 6 y 11).

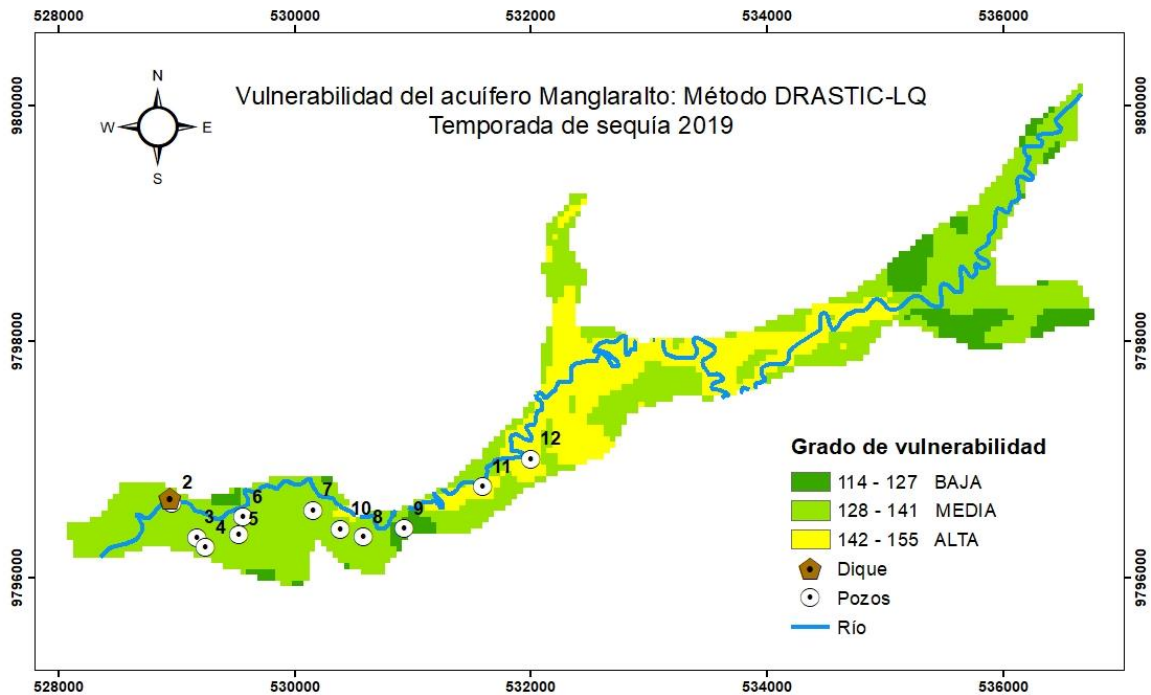


Figura 11: Método DRASTIC-LQ: Mapa de vulnerabilidad (julio 2019).

4.1.5. Vulnerabilidad estacional del acuífero para el año 2020

Temporada de lluvia 2020 (Mes referencial: Febrero)

En el año 2020 en temporada de lluvia, se tienen índices y grados de vulnerabilidad desde 114 (baja) hasta 155 (alta). El sector más vulnerable se encuentra en la zona media del acuífero, llegando hasta el pozo 11 y 12, resultando este último con una vulnerabilidad alta. Se evidencia que aplicando el método DRASTIC-LQ aumenta la vulnerabilidad, especialmente en la zona media (sector nororiental muestreado), donde inicialmente se mostraron sectores amarillos (alta) y verde claro (media) (figura 6), y luego predomina la coloración amarilla cuando se empleó DRASTIC-LQ (figura 12).

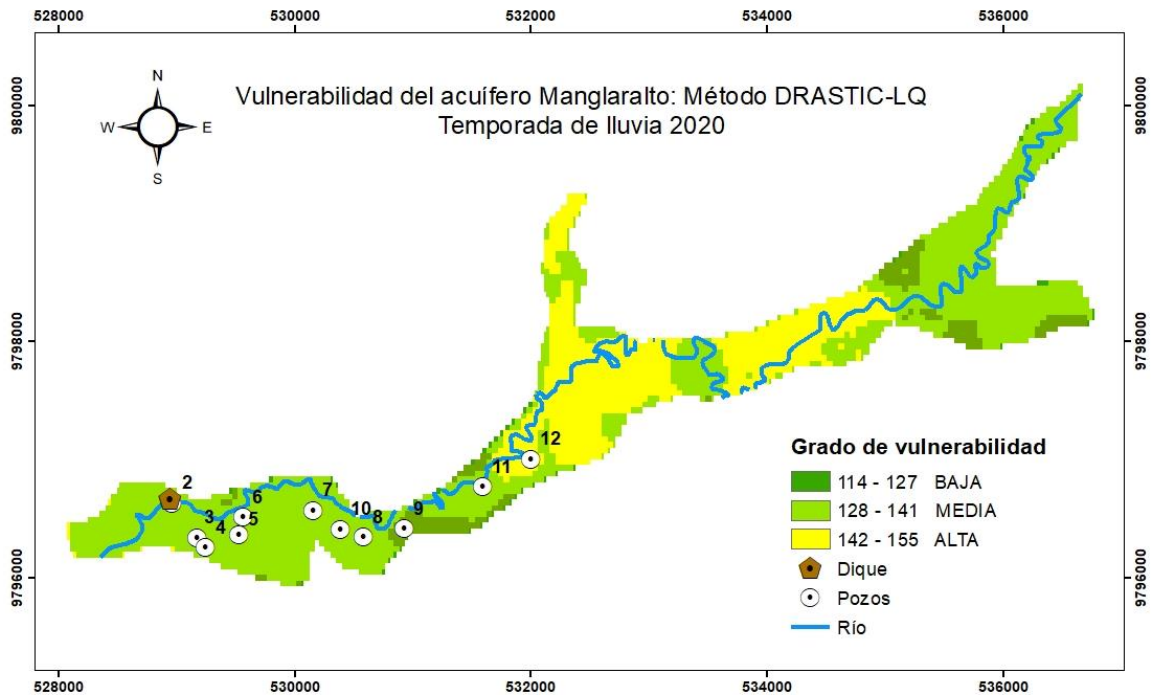


Figura 12: Método DRASTIC-LQ: Mapa de vulnerabilidad (febrero 2020).

Temporada seca 2020 (Mes referencial: julio)

En el año 2020, en temporada seca, se tienen índices y grados de vulnerabilidad desde 114 (baja) hasta 141 (media). El sector más vulnerable se encuentra en los pozos 2, 3, 4, 7, 8, 10, 11 y 12 (figura 13), reflejándose similar apreciación con ambos métodos. No se muestran cambios bruscos, es decir, con ambos métodos se obtiene una vulnerabilidad muy similar. Aunque se destaca que, en esta temporada, es donde se aprecia menor vulnerabilidad, en comparación con la temporada seca del 2019 (figura 7).

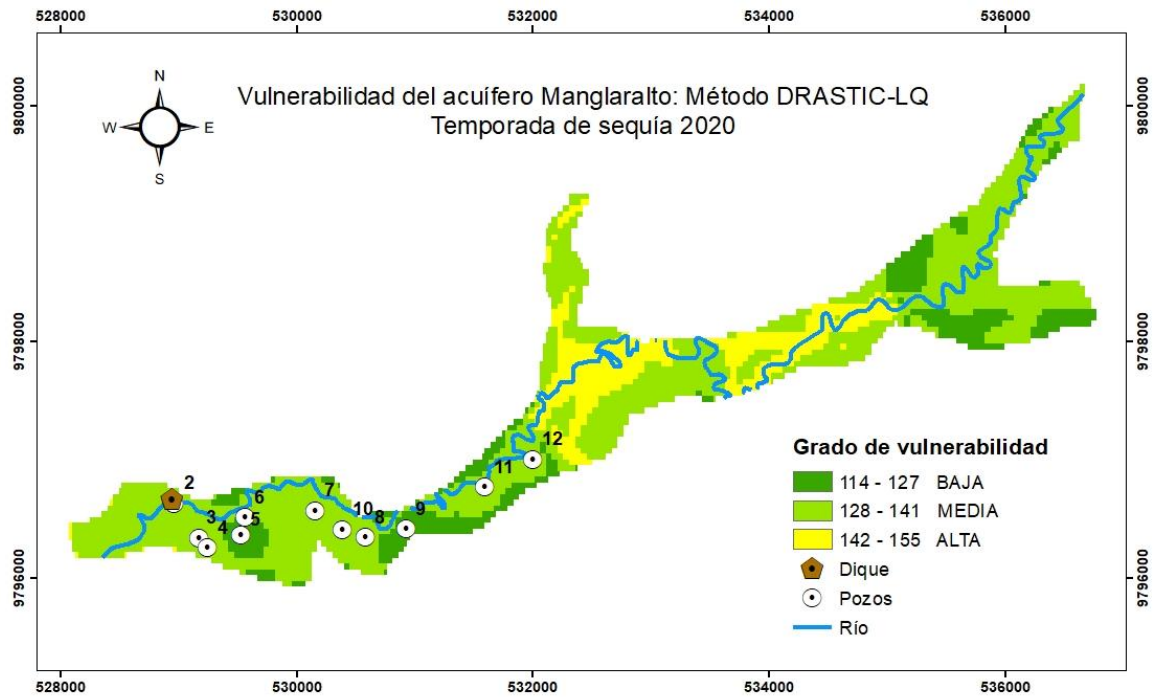


Figura 13: Método DRASTIC-LQ: Mapa de vulnerabilidad (julio 2020).

4.1.6. Vulnerabilidad estacional del acuífero para el año 2021

Temporada de lluvia 2021 (Mes referencial: Febrero)

En el año 2021, en temporada de lluvia (ver figura 14), se tienen índices y grados de vulnerabilidad desde 142 (alta) hasta 183 (extremadamente alta). Donde el sector más vulnerable se encuentra en la zona del pozo 11, donde se pasó de vulnerabilidad muy alta (DRASTRIC) a extremadamente alta (DRASTIC-LQ). En la zona baja predomina el color amarillo (vulnerabilidad alta), coincidiendo en esto ambos métodos (figuras 8 y 14), siendo este el menor grado de vulnerabilidad para este año. En DRASTIC-LQ, se incrementa la vulnerabilidad, especialmente en la zona del pozo 11.

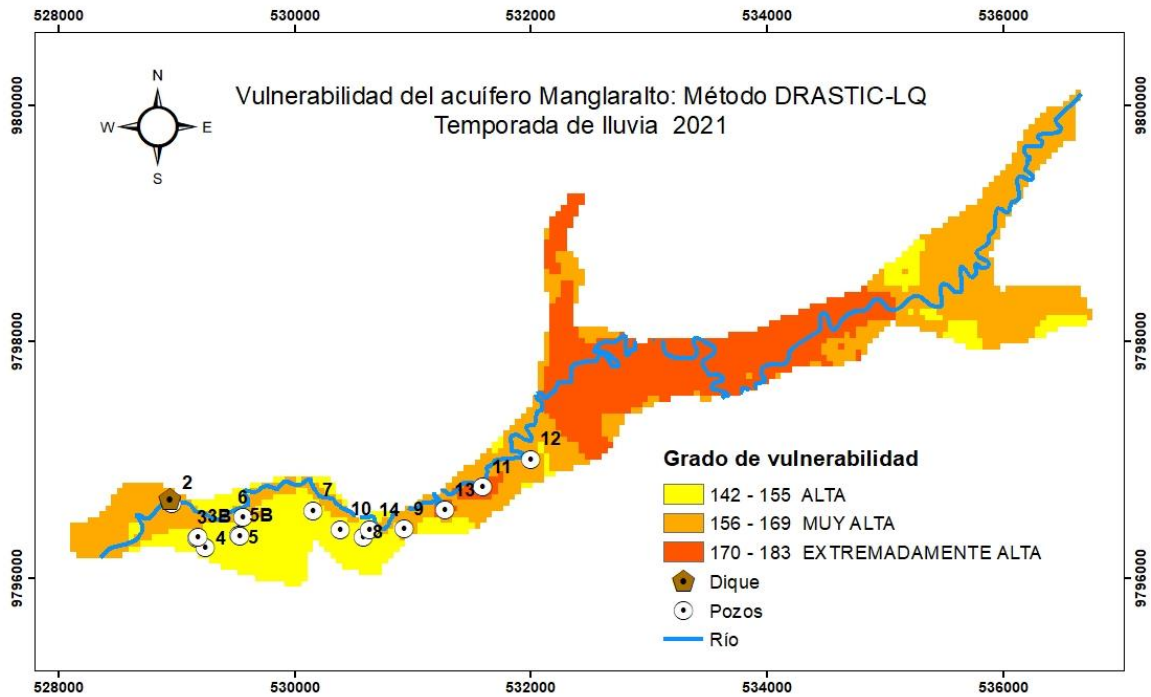


Figura 14: Método DRASTIC-LQ: Mapa de vulnerabilidad (febrero 2021).

Temporada seca 2021 (Mes referencial: julio)

En el año 2021, en temporada de seca, al igual que en la temporada húmeda, se tienen índices y grados de vulnerabilidad desde 128 (media) hasta 183 (extremadamente alta). El sector más vulnerable se encuentra en la zona media del acuífero, y coincide con los límites del río, el cual también está rodeado de color anaranjado (muy alta). En el método convencional (DRASTIC), se muestra como antes de llegar a la zona media, justo en el borde, la vulnerabilidad es baja, mostrando el color verde claro (vulnerabilidad media) (ver figuras 9 y 10). Esto último ya no se aprecia al aplicar DRASTIC-LQ (figura 15), debido a que se incrementa la vulnerabilidad en todos los sectores, hasta los pozos 6, 14, 9 y 11.

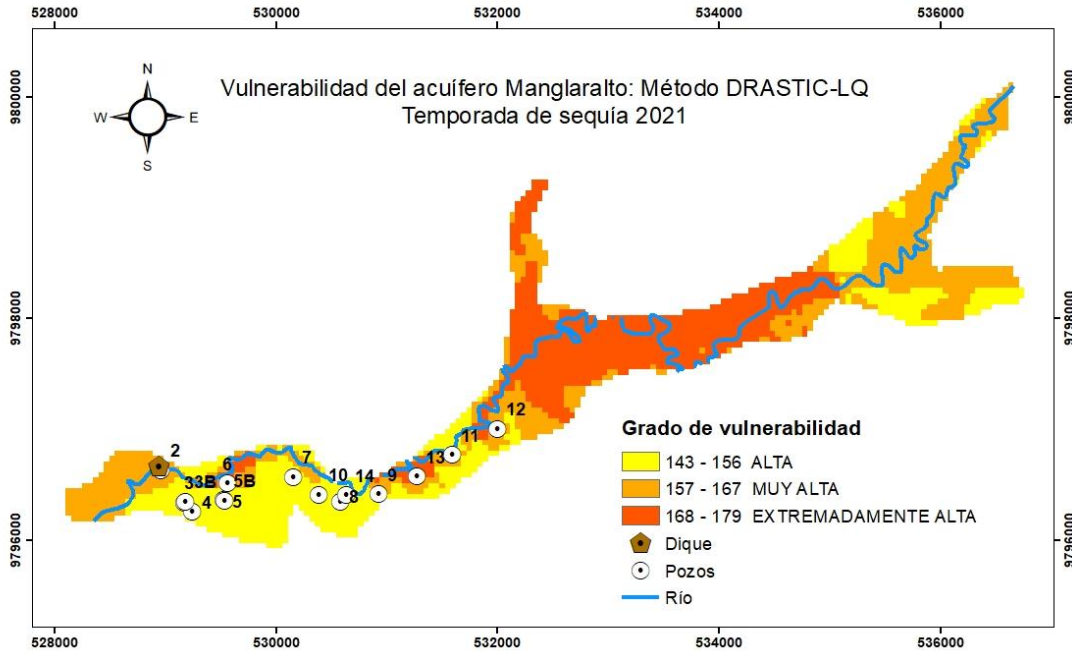


Figura 15: Método DRASTIC-LQ: Mapa de vulnerabilidad (julio 2021).

4.1.3.7. Comparación entre los índices de vulnerabilidad DRASTIC y DRASTIC-LQ

Resumen para el año 2019: temporadas lluviosa y seca.

En la tabla 6 se presenta el resumen de los índices de vulnerabilidad DRASTIC y DRASTIC-LQ para el año 2019, correspondientes a las temporadas lluviosa y seca, en el acuífero costero Manglaralto.

Para la temporada lluviosa (febrero) se registró un Índice promedio de vulnerabilidad DRASTIC (IV-DRASTIC) de 120.7 ± 6.8 (Mín: 110 – Máx: 132), que resulta notoriamente menor con respecto al calculado con el método DRASTIC-LQ (IV-DRASTIC-LQ) y que fue de 125.2 ± 6.2 (Mín: 117 – Máx: 135). Se aprecia en el rango de valores para cada método, indica una mayor variabilidad para el método DRASTIC, expresado tanto para la desviación estándar (IV-DRASTIC: 6.8; IV-DRASTIC-LQ: 6.2), como para el rango de ambos (IV-DRASTIC: 22; IV-DRASTIC-LQ: 18).

Para la temporada seca (julio) se registró un Índice promedio IV-DRASTIC de *vulnerabilidad alta* (157.2 ± 14.7 ; Mín: 137 – Máx: 185), que es menor con respecto al calculado con el método DRASTIC-LQ (IV-DRASTIC-LQ: *vulnerabilidad muy alta*), y que fue de 160.5 ± 14.2 (Mín: 139 – Máx: 187). Se observa que el rango de valores tanto para el método DRASTIC como para DRASTIC-LQ resultan mayores con respecto a la temporada lluviosa (IV-DRASTIC: 48; IV-DRASTIC-LQ: 48), lo que es corroborado por la desviación estándar (IV-DRASTIC: 14.7; IV-DRASTIC-LQ: 14.2) (ver tabla 6).

La comparación de los IV con base en el Test no paramétrico de los rangos con signo de **Wilcoxon (Wilcoxon)** y que se establece “sobre el signo de las diferencias y la magnitud de las diferencias entre parejas ($\alpha: 0.05$)” (Quispe Quiroz, 2015, p. 95). Este test arroja diferencias significativas entre los dos índices de vulnerabilidad para la temporada lluviosa (**Wilcoxon: 3.035; p-valor: $0.002 \leq 0.05$**). Esto también fue apreciado al comparar los índices para la temporada seca (**Wilcoxon: 2.889; p-valor: $0.004 \leq 0.05$**). Esto indica que la magnitud de las diferencias resulta influida por los mayores promedios obtenidos con el índice DRASTIC-LQ, que por tanto tiende a reflejar mayores valores de vulnerabilidad, más allá de la categorización teórica, la cual presenta intervalos muy amplios para precisar la misma.

En ambos casos se descarta la hipótesis nula (H_0) de igualdad de diferencias y magnitudes (ver tabla 6).

Tabla 6: Comparación entre los índices de vulnerabilidad DRASTIC y DRASTIC-LQ para el año 2019: temporadas lluviosa y seca.

	Media	DS	Mínimo	Máximo	Grado de vulnerabilidad	Wilcoxon ¹	
						Z	p-valor
Vulnerabilidad DRASTIC - FEBRERO 2019	120.7	6.8	110	132	Media	3.035	0.002**
Vulnerabilidad DRASTIC-LQ - FEBRERO 2019	125.2	6.2	117	135	Media		
Vulnerabilidad DRASTIC - JULIO 2019	157.2	14.7	137	185	Alta	2.889	0.004**
Vulnerabilidad DRASTIC-LQ - JULIO 2019	160.5	14.2	139	187	Muy alta		

Nota: ¹Prueba de rangos con signo de Wilcoxon; *p-valor significativo al 0.05; **p-valor significativo al 0.01.

Resumen para el año 2020: temporadas lluviosa y seca.

En la tabla 7 se presenta el resumen de los índices de vulnerabilidad DRASTIC y DRASTIC-LQ para el año 2020, correspondientes a las temporadas lluviosa y seca, en el acuífero costero Manglaralto.

Para la temporada lluviosa (febrero) se registró un Índice promedio de vulnerabilidad DRASTIC *media* (IV-DRASTIC) de 121.6 ± 4.0 (Mín: 114 – Máx: 130), que resulta notoriamente menor con respecto al calculado con el método DRASTIC-LQ (IV-DRASTIC-LQ) y que fue también de *vulnerabilidad media* (124.4 ± 4.5 ; Mín: 115 – Máx: 133). Se aprecia en el rango de valores para cada método, indica una mayor variabilidad para el método DRASTIC-LQ, expresado tanto para la desviación estándar (IV-DRASTIC: 4.0; IV-DRASTIC-LQ: 4.5), como para el rango de ambos (IV-DRASTIC: 16; IV-DRASTIC-LQ: 18).

Tabla 7: Comparación entre los índices de vulnerabilidad DRASTIC y DRASTIC-LQ para el año 2020: temporadas lluviosa y seca.

	Media	DS	Mínimo	Máximo	Grado de vulnerabilidad	Wilcoxon ¹ Z	p-valor
Vulnerabilidad DRASTIC - FEBRERO 2020	121.6	4.0	114	130	Media	2.877	0.004**
Vulnerabilidad DRASTIC-LQ - FEBRERO 2020	124.4	4.5	115	133	Media		
Vulnerabilidad DRASTIC - JULIO 2020	119.6	3.7	112	124	Baja	2.530	0.011**
Vulnerabilidad DRASTIC-LQ - JULIO 2020	121.4	4.2	114	126	Media		

Nota: ¹Prueba de rangos con signo de Wilcoxon; *p-valor significativo al 0.05; **p-valor significativo al 0.01.

Para la temporada seca (julio) se registró un Índice promedio IV-DRASTIC de *Vulnerabilidad baja* (119.6 ± 3.7 ; Mín: 112 – Máx: 124), que es menor con respecto al calculado con el método DRASTIC-LQ (IV-DRASTIC-LQ: *vulnerabilidad media*), y que fue de 121.4 ± 4.2 (Mín: 114 – Máx: 126). Se observa que el rango de valores tanto para el método DRASTIC como para DRASTIC-LQ resultan menores con respecto a la temporada lluviosa (IV-DRASTIC: 12; IV-DRASTIC-LQ: 12), sin

embargo, la desviación estándar (IV-DRASTIC: 3.7; IV-DRASTIC-LQ: 4.2), resulta bastante similar a la apreciada en la temporada lluviosa (ver tabla 7).

Este test de los rangos con signo de **Wilcoxon** nuevamente muestra diferencias significativas entre los dos índices de vulnerabilidad para la temporada lluviosa (**Wilcoxon**: 2.877; **p-valor**: $0.004 \leq 0.05$). Al comparar los índices para la temporada seca también surgieron estas diferencias (**Wilcoxon**: 2.530; **p-valor**: $0.011 \leq 0.05$) (ver tabla 7). La magnitud de las diferencias evidencia las mayores valoraciones para el índice DRASTIC-LQ, que por tanto tiende a mostrar mayores valores de vulnerabilidad. En tal sentido, se rechaza la hipótesis nula (H_0) (ver tabla 7).

Resumen para el año 2021: temporadas lluviosa y seca.

En la tabla 8 se presenta el resumen de los índices de vulnerabilidad DRASTIC y DRASTIC-LQ para el año 2021 (temporadas lluviosa y seca), en el acuífero costero Manglaralto.

Para la temporada lluviosa (febrero) se registró un Índice promedio de vulnerabilidad DRASTIC *alta* (IV-DRASTIC) de 143.8 ± 5.5 (Mín: 138 – Máx: 150), el cual es menor con respecto al calculado con el método DRASTIC-LQ (IV-DRASTIC-LQ) y que fue también de *vulnerabilidad alta* (147.0 ± 6.6 ; Mín: 139 – Máx: 157). Se aprecia en el rango de valores para cada método, indica una mayor variabilidad para el método DRASTIC-LQ, expresado tanto para la desviación estándar (IV-DRASTIC: 5.5; IV-DRASTIC-LQ: 6.6), como para el rango de ambos (IV-DRASTIC: 12; IV-DRASTIC-LQ: 18) (ver tabla 8).

Para la temporada seca (julio) se registró un Índice promedio IV-DRASTIC de *Vulnerabilidad alta* (143.1 ± 4.9 ; Mín: 138 – Máx: 150), que es menor con respecto al calculado con el método DRASTIC-LQ (IV-DRASTIC-LQ: *vulnerabilidad alta*), y que fue de 145.1 ± 5.7 (Mín: 138 – Máx: 154). Se observa que los promedios, la

desviación estándar (IV-DRASTIC: 4.9; IV-DRASTIC-LQ: 5.7) y el rango de valores tanto para el método DRASTIC como para DRASTIC-LQ resultan similares con respecto a la temporada lluviosa (IV-DRASTIC: 12; IV-DRASTIC-LQ: 16) (ver tabla 8). Sin embargo, hay que señalar que el año 2021 se diferencia en cuanto a los promedios y la categorización (*vulnerabilidad alta*), con respecto a los años 2019 y 2020, excepción hecha de la temporada seca del año 2019, donde se apreciaron índices IV-DRASTIC: vulnerabilidad alta y un IV-DRASTIC-LQ: vulnerabilidad muy alta (ver tabla 6).

Tabla 8: Comparación entre los índices de vulnerabilidad DRASTIC y DRASTIC-LQ para el año 2021: temporadas lluviosa y seca.

	Media	DS	Mínimo	Máximo	Grado de vulnerabilidad	Wilcoxon ¹	
						Z	p-valor
Vulnerabilidad DRASTIC - Febrero 2021	143.8	5.5	138	150	Alta	2.701	0.007**
Vulnerabilidad DRASTIC-LQ - febrero 2021	147.0	6.6	139	157	Alta		
Vulnerabilidad DRASTIC - Julio 2021	143.1	4.9	138	150	Alta	2.070	0.038*
Vulnerabilidad DRASTIC-LQ - JULIO 2021	145.1	5.7	138	154	Alta		

Nota: ¹Prueba de rangos con signo de Wilcoxon; *p-valor significativo al 0.05; **p-valor significativo al 0.01.

Este test de los rangos con signo de **Wilcoxon** nuevamente muestra diferencias significativas entre los dos índices de vulnerabilidad para la temporada lluviosa (**Wilcoxon:** 2.701; **p-valor:** $0.007 \leq 0.05$). La comparación de los índices para la temporada seca pone de manifiesto también diferencias (**Wilcoxon:** 2.070; **p-valor:** $0.038 \leq 0.05$) (ver tabla 8). La magnitud de las diferencias refleja las mayores valoraciones determinadas para el índice DRASTIC-LQ, que por tanto tiende a mostrar mayores valores de vulnerabilidad. En tal sentido, se rechaza la hipótesis nula (H_0) (ver tabla 8).

Comparación entre los índices de vulnerabilidad DRASTIC y DRASTIC-LQ para el período 2019-2021

En la tabla 9 se presenta el resumen de los índices de vulnerabilidad DRASTIC y DRASTIC-LQ para el periodo 2019-2021, en el acuífero costero Manglaralto. El Índice promedio de vulnerabilidad DRASTIC (IV-DRASTIC 2019-2021) fue de 134.2 ± 16.662 (Mín: 110 – Máx: 185), que resulta menor con respecto al calculado con el método DRASTIC-LQ (IV-DRASTIC-LQ 2019-2021) y que fue de 137.2 ± 16.703 (Mín: 114 – Máx: 187). Se aprecia una mayor variabilidad similar para ambos métodos, expresado esto tanto para la desviación estándar (IV-DRASTIC: 16.662; IV-DRASTIC-LQ: 16.703), como para el rango de ambos (IV-DRASTIC: 75; IV-DRASTIC-LQ: 73).

Tabla 9: Comparación Entre Los Índices De Vulnerabilidad DRASTIC y DRASTIC-LQ para el período 2019-2021.

	Media	DS	Mínimo	Máximo	Grado de vulnerabilidad	Wilcoxon ¹ Z	p-valor
IV - DRASTIC (2019 - 2021)	134.2	16.662	110	185	Media	6.325	0.000**
IV - DRASTIC-LQ (2019 - 2021)	137.2	16.703	114	187	Media		

Nota: ¹Prueba de rangos con signo de Wilcoxon; *p-valor significativo al 0.05; **p-valor significativo al 0.01.

A pesar de registrarse similitud en la variabilidad, el test de los rangos con signo de **Wilcoxon** refleja diferencias significativas entre los dos índices de vulnerabilidad para el período 2019-2021 (**Wilcoxon**: 6.325; **p-valor**: $0.000 \leq 0.05$), en tal sentido, se rechaza la hipótesis nula (H_0) (ver tabla 8). La magnitud de las diferencias confirma desde el punto de vista inferencial que las mayores valoraciones de vulnerabilidad corresponden al índice DRASTIC-LQ, que por tanto resulta más exigente al realizar la estimación de vulnerabilidad del acuífero (ver tabla 9).

4. 2. Discusión

4.2.1. Vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas del acuífero costero Manglaralto mediante el método DRASTIC.

Los resultados de este trabajo corroboran que el método DRASTIC propuesto por Aller et al. (1987) sigue siendo una ruta válida y confiable para establecer la vulnerabilidad de un acuífero, y que además es adecuado para utilizarse tanto en temporadas lluviosa como seca.

Ya Morante et al. (2019) habían señalado la vulnerabilidad del acuífero a las prácticas agropecuarias, pero también a las condiciones hidrogeoquímicas y a la herencia geológica en el área. Este trabajo confirma la existencia de condiciones de vulnerabilidad.

La vulnerabilidad según el método DRASTIC resultó en general media, pero se registró un intervalo desde *vulnerabilidad baja* (IV-DRASTIC - JULIO 2020) hasta *alta* (IV-DRASTIC 2021). Se evidenció también una variabilidad estacional que sugiere la influencia de los niveles freáticos y la escorrentía sobre el sistema, en asociación con las condiciones morfológicas de la zona.

Lloor et al. (2019), habían resaltado este tipo de relaciones en su estudio sobre vulnerabilidad de los acuíferos ante la percolación de agroquímicos en el cantón Gral. Antonio Elizalde (Bucay). Destacaron las condiciones intrínsecas y morfológicas del acuífero y sus efectos por la percolación de agroquímicos, resultantes de actividades agrícolas, empleando el método DRASTIC.

Se coincide con Barbulescu (2020), en que el método DRASTIC resulta adecuado para evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas, resaltando la amplitud de los parámetros que considera. Sin embargo, estudios más recientes han recomendado la incorporación de SIG con especial énfasis en la contaminación agrícola tal como se han venido desarrollando en India (Bera et al., 2021), donde se ha logrado mitigar la contaminación antropogénica y agrícola con base en un mejor control y gestión.

Durango-Cordero et al. (2022), habían hecho una sugerencia similar para la evaluación de las aguas subterráneas en la Amazonia ecuatoriana mediante la integración SIG-DRASTIC modificado. Aunque en Manglaralto esto comienza apenas a implantarse mediante el desarrollo de mapas como los diseñados en este trabajo, falta avanzar para realizar un análisis espacial, donde se integren la planificación del uso de la tierra, el impacto en la salud pública y las variaciones mensuales.

Similares bondades del método DRASTIC para evaluar la vulnerabilidad de aguas subterráneas fueron señaladas por Asfaw & Mengistu (2020) en Ethiopia, aspecto con el cual se concuerda.

Giambastiani et al. (2021), había mencionado la importancia de incorporar parámetros como la salinidad y el nivel freático en estimaciones en acuíferos costeros en la Emilia Romagna italiana, destacando localizaciones de cuña de playa, que facilitan la conectividad entre las aguas subterráneas y las superficiales. En este trabajo no se considera el papel de la salinización de las aguas superficiales y subterráneas a lo largo del contacto con la costa.

Sin embargo, si se realiza una estimación del papel del nivel freático con base en la variabilidad estacional. Esta arrojó diferencias en los índices de *vulnerabilidad* desde *baja* hasta *alta*, lo cual requeriría un estudio más amplio para determinar su influencia con base también en las oscilaciones de las precipitaciones en la región.

4.2.2. Vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas del acuífero costero Manglaralto mediante el método DRASTIC-LQ.

El método **DRASTIC-LQ** propuesto de Carrión Mero et al. (2021), se fundamenta en los parámetros del método DRASTIC, al cual se le suman dos parámetros adicionales, los cuales pueden estar presentes en distintos sistemas acuíferos, y que son la recarga lateral (L) y la influencia de una recarga zonificada, en este caso mediante un dique (Q), obteniendo el método DRASTIC-LQ.

Los resultados de este trabajo corroboran que el método DRASTIC propuesto por Aller et al. (1987), utilizado de base, sirve de fundamento para experimentar con nuevas aproximaciones de evaluación a la vulnerabilidad. La adición de la recarga lateral (L) y la influencia de una recarga zonificada, en este caso mediante un dique (Q), demostraron ser factores diferenciadores con respecto a la estimación realizada con el método DRASTIC, tanto en las temporadas lluviosa como seca.

En tal sentido, el método **DRASTIC-LQ** confirma la existencia de condiciones de vulnerabilidad y resulta ser más sensible en la estimación que lo reportado u obtenido con el método DRASTIC.

La vulnerabilidad según el método DRASTIC-LQ resultó en general media, pero se registró un intervalo desde *vulnerabilidad media* hasta *vulnerabilidad muy alta* (IV-DRASTIC - JULIO 2019), la cual responde también al componente estacional, pero que deja claramente establecido la influencia de los niveles freáticos y la escorrentía sobre el sistema, en asociación con las condiciones morfológicas de la zona, y en especial con los factores añadidos al modelo como son la recarga lateral (L) y la influencia de una recarga zonificada, en este caso mediante un dique (Q).

Los resultados coinciden con lo expresado por Carrión Mero et al. (2021), y contribuye a la validación del método, el cual aún se encuentra en fase de experimentación y validación.

Sin embargo, estos resultados *a priori* confirman la idea de que la recarga lateral (recarga de borde), es un factor significativo en el aporte del agua subterránea, originado mediante la escorrentía producto de las precipitaciones, propias de la temporada lluviosa. Por su parte el dique es considerado debido a su importante aplicación en la recarga superficial del acuífero, el cual puede incidir en la contaminación. Carrión Mero et al. (2021), establecieron que el modelo dependerá de las condiciones climatológicas de cada año, destacando el peso de la recarga y el dique.

Se logra apreciar así que es posible ampliar los estudios y determinaciones de la vulnerabilidad de acuíferos partiendo de métodos ampliamente validados como DRASTIC, pero que ha sido potenciado en este caso por las modificaciones aplicadas por Carrión Mero et al. (2021), existiendo otras posibilidades adicionales como la propuesta por Voutchkova et al. (2021), denominada DRASTIC-N.

4.2.3. Comparación entre los índices de vulnerabilidad DRASTIC y DRASTIC-LQ para el período 2019-2021.

La comparación de índices de vulnerabilidad a partir de los métodos DRASTIC y DRASTIC-LQ para el período 2019-2021 arrojó diferencias significativas inferidas con base en el test de los rangos con signo de Wilcoxon.

Las mismas fueron identificadas al hacer el contraste entre las temporadas lluviosa (IV-DRASTIC vs DRASTIC-LQ en temporada lluviosa) y seca (IV-DRASTIC vs DRASTIC-LQ en temporada seca). En ambos se rechazó la hipótesis nula de igualdad de diferencias y magnitudes ($p\text{-valor} \leq 0.05$).

También se identificaron diferencias significativas al comparar las magnitudes de las diferencias entre los índices IV-DRASTIC-2019-2021 y DRASTIC-LQ-2019-2021, lo que confirma desde el punto de vista inferencial que las mayores valoraciones de vulnerabilidad corresponden al índice DRASTIC-LQ, que por tanto resulta mucho más exigente al realizar la estimación de vulnerabilidad del acuífero.

Esto sugiere que el índice de vulnerabilidad DRASTIC-LQ al incorporar los parámetros de recarga lateral (L) y la influencia de una recarga zonificada, en este caso mediante un dique (Q), revela una vulnerabilidad mayor en comparación con DRASTIC.

Las modificaciones aplicadas por Carrión Mero et al. (2021), resultan en un modelo que potencia el método y que se diferencia de DRASTIC a partir de parámetros vinculados a la pluviometría y escorrentía del lugar. La propuesta por Voutchkova

et al. (2021), denominada DRASTIC-N también había resultado exitosa en cuanto a la sensibilidad de la misma para revelar estados de vulnerabilidad, por tanto el aporte de Carrión Mero et al. (2021) resulta apropiado para continuar evaluando la vulnerabilidad.

Rueda & Betancur (2006), había señalado que actualmente la valoración de la vulnerabilidad constituye un proceso multicriterio donde se combina la estimación de un conjunto de parámetros propios del sistema acuífero, con el objeto de generar un mapa donde se diferencien las áreas de distinta vulnerabilidad.

Barbulescu (2020), ha promovido las bondades de los métodos DRASTIC y similares para evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas porque brindan información que ayuda a preservar la calidad del agua y de los en general.

Loor et al. (2019), habían señalado en un acuífero ecuatoriano una alta vulnerabilidad, y por ende la necesidad de implementar políticas y buenas prácticas para el agro y la preservación del acuífero, ante la alta vulnerabilidad estimada, situación que serviría de guía para Manglaralto.

Los resultados son también coincidentes con lo expresado por Nasri et al. (2021), en lo correspondiente a la vulnerabilidad de los acuíferos costeros y a la necesidad de contar con un monitoreo sistemático de los mismos. Esto sería coherente con los lineamientos de la OMS & UNICEF (2017), en cuanto al cuidado de la sanidad y suministro confiable del recurso agua.

Se coincide con Herrera (2016), en que resulta necesario la instauración de un modelo de gestión sostenible del acuífero de Manglaralto, donde se considere la variable geoespacial, de manera que se mejoren los muestreos y monitoreo con base en una red geolocalizada que coadyuve al mejor aprovechamiento del acuífero costero y a su protección, de cara al cumplimiento de los objetivos del desarrollo sostenible vinculados a los recursos acuíferos.

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES

1. Con respecto al objetivo general se demostró que existe una vulnerabilidad del acuífero costero Manglaralto la cual fue estimada por igual mediante los métodos DRASTIC y DRASTIC-LQ.
2. La vulnerabilidad según el método DRASTIC resultó en general media, pero se registró un intervalo desde *vulnerabilidad baja* (IV-DRASTIC - JULIO 2020) hasta *alta* (IV-DRASTIC 2021). Se evidenció también una variabilidad estacional que sugiere la influencia de los niveles freáticos y la escorrentía sobre el sistema, en asociación con las condiciones morfológicas de la zona.
3. La vulnerabilidad según el método DRASTIC-LQ resultó en general *media*, pero se registró un intervalo desde vulnerabilidad media hasta *vulnerabilidad muy alta* (IV-DRASTIC - JULIO 2019), la cual responde también al componente estacional, pero que deja claramente establecido la influencia de los niveles freáticos y la escorrentía sobre el sistema, en asociación con las condiciones morfológicas de la zona, y en especial con los factores añadidos al modelo como son la recarga lateral (L) y la influencia de una recarga zonificada, en este caso mediante un dique (Q).
4. La comparación de índices de vulnerabilidad a partir de los métodos DRASTIC y DRASTIC-LQ para el período 2019-2021 arrojó diferencias significativas inferidas con base en el test de los rangos con signo de Wilcoxon. Las mismas fueron identificadas al hacer el contraste entre las temporadas lluviosa (IV-DRASTIC vs DRASTIC-LQ en temporada lluviosa) y seca (IV-DRASTIC vs DRASTIC-LQ en temporada seca). En ambos se rechazó la hipótesis nula de igualdad de diferencias y magnitudes ($p\text{-valor} \leq 0.05$). También se identificaron

diferencias significativas al comparar las magnitudes de las diferencias entre los índices IV-DRASTIC-2019-2021 y DRASTIC-LQ-2019-2021, lo que confirma desde el punto de vista inferencial que las mayores valoraciones de vulnerabilidad corresponden al índice DRASTIC-LQ, que por tanto resulta mucho más exigente al realizar la estimación de vulnerabilidad del acuífero.

CAPITULO VI

6. RECOMENDACIONES

1. A partir de los resultados de este trabajo conviene seguir empleando el modelo DRASTIC-LQ propuesto por Carrión Mero et al. (2021), de manera que se contribuya a la validación del método, el cual aún se encuentra en fase de experimentación y validación.
2. Se recomienda continuar con la evaluación sistemática de la vulnerabilidad pasando a esquemas de muestreo mensuales o trimestrales que representen un avance con respecto al marco muestral empleado en este trabajo.
3. Resulta necesario la instauración de un modelo de gestión sostenible del acuífero de Manglaralto, donde se considere la variable geoespacial, de manera que se mejoren los muestreos y monitoreo con base en una red geolocalizada que coadyuve al mejor aprovechamiento del acuífero costero y a su protección, de cara al cumplimiento de los objetivos del desarrollo sostenible vinculados a los recursos acuíferos.

CAPÍTULO VII

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J. H. & Petty, R. J. (1987) DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. US Environ. Protection Agency EPA/600/2-85-018.
- Aranda, D. F. C. (1984). Procesos del ciclo hidrológico. UASLP.
- Arias, M. (2011). Estudio hidrogeológico regional de la cuenca del río Frío. San José, Costa Rica: Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica.
- Asfaw, D., & Mengistu, D. (2020). Modeling megech watershed aquifer vulnerability to pollution using modified DRASTIC model for sustainable groundwater management, Northwestern Ethiopia. *Groundwater for Sustainable Development*, 11, 100375.
- Barbulescu, A. (2020). Assessing groundwater vulnerability: DRASTIC and DRASTIC-like methods: a review. *Water*, 12(5), 1356.
- Batu, V. (1998). Hidráulica de acuíferos: una guía completa para el análisis de datos hidrogeológicos . John Wiley e hijos.
- Bera, A., Mukhopadhyay, B. P., Chowdhury, P., Ghosh, A., & Biswas, S. (2021). Groundwater vulnerability assessment using GIS-based DRASTIC model in Nangasai River Basin, India with special emphasis on agricultural contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 214, 112085.

- Carbonell, A. (1993). Groundwater vulnerability assessment: predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty. Washington DC: National Research Council.
- Carrión, P., Herrera, G., Briones, J., Sánchez, C., & Limón, J. (2018). Practical adaptations of ancestral knowledge for groundwater artificial recharge management of Manglaralto coastal aquifer, Ecuador. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 217, 375–386. <https://doi.org/10.2495/SDP180341>.
- Carrión-Mero, P., Montalván, F. J., Morante-Carballo, F., Loo-Flores de Valgas, C., Apolo-Masache, B., & Heredia, J. (2021). Flow and Transport Numerical Model of a Coastal Aquifer Based on the Hydraulic Importance of a Dyke and Its Impact on Water Quality: Manglaralto—Ecuador. *Water*, 13(4), 443.
- Casaño, C. D. L. C. (2016). La realidad de la metodología de la investigación en Ingeniería. 1(2), 7-8. <https://journals.continental.edu.pe/index.php/ingenium/article/view/439/435>
- Cegarra, J. (2004). Metodología de la investigación científica y tecnológica. Madrid: Díaz de Santos.
- Concytec (2018). Reglamento De Calificación, Clasificación Y Registro De Los Investigadores del Sistema Nacional De Ciencia, Tecnología E Innovación Tecnológica - Reglamento Renacyt. Autor.
- Durango-Cordero, J., Saqalli, M., Ferrant, S., Bonilla, S., Maurice, L., Arellano, P. y Elger, A. (2022). Risk assessment of unlined oil pits leaking into groundwater in the Ecuadorian Amazon: A modified GIS-DRASTIC approach. *Applied Geography*, (139), 102628. Doi: 10.1016/j.apgeog.2021.102628
- El Universo. (2015). Problemas en Manglaralto. www.eluniverso.com/opinion/2015/10/19/nota/5192870/problemas-manglaralto.

- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., & Paris, M. (2002). Propuestas Metodológicas para la Protección del Agua Subterránea. En *Protección de la Calidad del Agua Subterránea. Guías para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales* (págs. 15-34). Banco Mundial.
- Francese, R., Mazzarini, F., Bistacchi, A., Morelli, G., Pasquarà, G., Praticelli, N., Robain, H., Wardell, N., & Zaja, A. (2009). A structural and geophysical approach to the study of fractured aquifers in the Scansano-Magliano in Toscana Ridge, southern Tuscany, Italy. *Hydrogeology Journal*, 17(5), 1233–1246. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0435-1>
- García, F. (2009). *La investigación tecnológica. Investigar, idear e innovar en ingenierías y ciencias sociales*. México: Editorial Limusa.
- Giambastiani, B. M. S., Kidanemariam, A., Dagneu, A., & Antonellini, M. (2021). Evolution of salinity and water table level of the phreatic coastal aquifer of the Emilia Romagna region (Italy). *Water (Switzerland)*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/w13030372>.
- Glover, R. E. (1959). The pattern of fresh-water flow in a coastal aquifer. *Journal of Geophysical Research*, 64(4), 457–459. <https://doi.org/10.1029/jz064i004p00457>.
- Gricelda, H. F., Paúl, C. M., & Niurka, A. M. (2018). Participatory process for local development: Sustainability of water resources in rural communities: Case manglaralto-santa Elena, Ecuador. In *Handbook of Sustainability Science and Research* (pp. 663-676). Springer, Cham.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill.
- Herrera Franco, G., Flores Ruíz, D., Herrera Franco, D., & Flores Ruiz, G. (2009). Aspectos socioeconómicos de la gestión del agua y el turismo en las comunas Olón y Manglaralto de la provincia de Santa Elena (Ecuador). XI Congreso de

La AACR 2009. Cooperación Transfronteriza: Andalucía-Algarve-Alentejo, 13.
<http://www.aecr.org/web/congresosAACR/2009/pdfs/mesa2/3-9.pdf>

Herrera, G. (2016). Estudio para un Modelo de Gestión de un Acuífero Costero, mediante Metodologías Participativas y Análisis Geoestadístico en el marco del Desarrollo Local. Manglaralto, Ecuador. Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

Herrera-Franco, G., Carrión-Mero, P., Aguilar-Aguilar, M., Morante-Carballo, F., Jaya Montalvo, M., & Morillo-Balsera, M. C. (2020). Groundwater Resilience Assessment in a Communal Coastal Aquifer System. The Case of Manglaralto in Santa Elena.

Hispagua-Sistema Español de Información sobre el Agua. (2017). Contaminación de acuíferos. <http://hispagua.cedex.es/datos/hidrogeologia#9>

Hoekstra, A. Y. (2016). A critique on the water-scarcity weighted water footprint in LCA. (J. Marques, & F. Müller, Edits.) *Ecological Indicators*, 66, 564- 573.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.026>.

Hoque, M. A., Burgess, W. G., & Ahmed, K. M. (2017). Integration of aquifer geology, groundwater flow and arsenic distribution in deltaic aquifers – A unifying concept. *Hydrological Processes*, 31(11), 2095–2109.
<https://doi.org/10.1002/hyp.11181>.

Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2010.
<https://www.ecuadorencifras.gob.ec/institucional/home/>

Journal of African Earth Sciences, 39(3–5), 509–516.
<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2004.07.013>.

Le Borgne, T., Bour, O., De Dreuzy, J. R., Davy, P., & Touchard, F. (2004). Equivalent mean flow models for fractured aquifers: Insights from a pumping tests scaling interpretation. *Water Resources Research*, 40(3), 1–12.
<https://doi.org/10.1029/2003WR002436>.

- Loor Bruno, Á. C., Carrión Rodríguez, R. A., & Mantilla Campaña, G. V. (2019). Vulnerabilidad de los acuíferos ante la percolación de agroquímicos en el cantón Gral. Antonio Elizalde. *Revista Universidad y Sociedad*, 11(2), 395-401.
- Margat, J. (1968). *Vulnérabilité des nappes d'eau souterraines à la pollution*. Orléans: Bases de la Cartographie.
- Martínez et al. (1998). Aplicación del método DRASTIC para la evaluación del riesgo de afección a las aguas subterráneas por una obra lineal. *Memorias de las Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente*. Valencia 1998. AIH-GE.
- Mateos, R. M., Ezquerro, P., Luque-Espinar, J. A., Béjar-Pizarro, M., Notti, D., Azañón, J. M., Montserrat, O., Herrera, G., Fernández-Chacón, F., Peinado, T., Galve, J. P., Pérez-Peña, V., Fernández-Merodo, J. A., & Jiménez, J. (2017). Multiband PSInSAR and long-period monitoring of land subsidence in a strategic detrital aquifer (Vega de Granada, SE Spain): An approach to support management decisions. *Journal of Hydrology*, 553, 71–87. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.056>
- Milanović, P. (2018). *Engineering karstology of dams and reservoirs*. CRC Press.
- Morante, F.; Montalván, F.J.; Carrión, P.; Herrera, G.; Heredia, J.; Elorza, F.J.; Pilco, D.; Solórzano, J. (2019). Hydrochemical and geological correlation to establish the groundwater salinity of the coastal aquifer of the Manglaralto River basin, Ecuador. *WIT Trans. Ecol. Environ.* , 229, 139–149.
- Nasri, G., Hajji, S., Aydi, W., Boughariou, E., Allouche, N., & Bouri, S. (2021). Water vulnerability of coastal aquifers using AHP and parametric models: methodological overview and a case study assessment. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(1), 1-19.
- Organización Mundial de la Salud-OMS & Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia-UNICEF. (2017). *Water and Sanitation for Health Water and*

Sanitation for Health. A practical guide for improving quality of care through water, sanitation and hygiene in health care facilities. Geneva: Naciones Unidas. Obtenido de Centro de Prensa: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs391/es/>

Quispe Quiroz, U. (2015). Fundamentos de Estadística Básica. Lima: Editorial San Marcos.

Rueda, O., & Betancur, T. (2006). Evaluación de la vulnerabilidad del agua subterránea en el Bajo Cauca Antioqueño. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 71-88.

Sánchez San Román, J. (2009). Conceptos fundamentales de Hidrogeología. Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, España, 1, 1–11. http://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos_Hidrogeol.pdf

Sierra Bravo, R. (2001). Técnicas de Investigación Social. Teoría y Ejercicios. Paraninfo S.A.

Subsecretaría de Agua potable y saneamiento básico. (2003). Guías técnicas para la reducción de la vulnerabilidad en los sistemas de agua potable y saneamiento. Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda.

U.S. Geological Survey (USGS). (2 de Diciembre de 2016). The Water Cycle: Freshwater Storage. Obtenido de The Water Cycle - USGS Water Science School: <https://water.usgs.gov/edu/watercyclefreshstorage.html>

Voutchkova, D. D., Schullehner, J., Rasmussen, P., & Hansen, B. (2021). A high-resolution nitrate vulnerability assessment of sandy aquifers (DRASTIC-N). *Journal of Environmental Management*, 277, 111330.

Worthington, S. R. H., Jeannin, P. Y., Alexander, E. C., Davies, G. J., & Schindel, G. M. (2017). Définitions contrastées pour le terme 'aquifère karstique.' *Hydrogeology Journal*, 25(5), 1237–1240. <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1628-7>

CAPÍTULO VIII

8. ANEXOS

Anexo 1: Operacionalización de variables

Variables	Definición operacional	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de evaluación
Variable 1: Vulnerabilidad mediante el método DRASTIC.	El método DRASTIC (Aller et al., 1987) “clasifica y pondera parámetros intrínsecos, reflejo de las condiciones naturales del medio y es el más difundido para determinar la vulnerabilidad de acuíferos” Martínez et al. (1998, p. 414).	“DRASTIC valora como parámetros: D (profundidad del nivel piezométrico), R (recarga), A (litología del acuífero), S (naturaleza del suelo), T (pendiente del terreno), I (naturaleza de la zona no saturada) y C (permeabilidad)” Martínez et al. (1998, p. 414).	Factores DRASTIC generales	(A) Naturaleza del acuífero (S) Tipo se suelo (T) Pendiente el terreno (I) Naturaleza de la zona vadosa (C) Conductividad eléctrica	Parámetros y rangos establecidos por el método DRASTIC
			Factores DRASTIC con variabilidad estacional	(D) Profundidad del nivel de agua (R) Recarga	
Variable 2: Vulnerabilidad mediante el método DRASTIC-LQ.	Modificación del método DRASTIC a partir de la incorporación de los factores Recarga lateral (L) Dique (Q) (Carrión 2021).	Valoración de los parámetros: “D (profundidad del nivel piezométrico), R (recarga), A (litología del acuífero), S (naturaleza del suelo), T (pendiente del terreno), I (naturaleza de la zona no saturada) y C (permeabilidad)” Martínez et al. (1998, p. 414), más la incorporación de los factores Recarga lateral (L) Dique (Q) (Carrión 2021).	Factores DRASTICLQ generales	(A) Naturaleza del acuífero (S) Tipo se suelo (T) Pendiente el terreno (I) Naturaleza de la zona vadosa (C) Conductividad eléctrica	Parámetros y rangos establecidos por el método DRASTIC-LQ
			Factores DRASTICLQ con variabilidad estacional	(D) Profundidad del nivel de agua (R) Recarga	
			Factores LQ	(L) Recarga lateral	
				(Q) Dique	

Fuente: El Autor.

Anexo 2: Instrumento de recolección de información



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES
ESCUELA DE POS-TGRADO

RECOLECCIÓN DE DATOS POR PARÁMETROS Y POZO

Dimensiones	Indicadores	VALORACIÓN DE LOS PARÁMETROS – MES DE FEBRERO (AÑO _____)									
		POZOS									
Factores DRASTIC generales	(A) Naturaleza del acuífero										
	(S) Tipo se suelo										
	(T) Pendiente el terreno										
	(I) Naturaleza de la zona vadosa										
	(C) Conductividad eléctrica										
Factores DRASTIC con variabilidad estacional	(D) Profundidad del nivel de agua										
	(R) Recarga										
Factores LQ	(L) Recarga lateral										
	(Q) Dique										

Dimensiones	Indicadores	VALORACIÓN DE LOS PARÁMETROS – MES DE JULIO (AÑO _____)									
		POZOS									
Factores DRASTIC generales	(A) Naturaleza del acuífero										
	(S) Tipo se suelo										
	(T) Pendiente el terreno										
	(I) Naturaleza de la zona vadosa										
	(C) Conductividad eléctrica										
Factores DRASTIC con variabilidad estacional	(D) Profundidad del nivel de agua										
	(R) Recarga										
Factores LQ	(L) Recarga lateral										
	(Q) Dique										

Anexo 3: Matriz de consistencia

Título: Vulnerabilidad del acuífero costero Manglaralto mediante los métodos DRASTIC y DRASTIC-LQ.

Problema	Hipótesis	Objetivos	Variables	Método
¿Cuál es la vulnerabilidad del acuífero costero Manglaralto estimada mediante los métodos DRASTIC y DRASTIC-LQ?	Existe una vulnerabilidad del acuífero costero Manglaralto la cual es estimada por igual mediante los métodos DRASTIC y DRASTIC-LQ.	Analizar la vulnerabilidad del acuífero costero Manglaralto mediante los métodos DRASTIC y DRASTIC-LQ.	Variables: Variable 1: Vulnerabilidad mediante el método DRASTIC. Variable 2: Vulnerabilidad mediante el método DRASTIC-LQ.	Enfoque: cuantitativo Diseño: No experimental Tipo de investigación: Descriptiva – comparativa.
Problema específicos	Hipótesis específicas	Objetivos específicos	Población y muestreo:	
1. ¿Cuál es la vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas del acuífero costero Manglaralto mediante el método DRASTIC?	HE1. La vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas del acuífero costero Manglaralto calculada mediante el método DRASTIC indica una <i>vulnerabilidad moderada</i> .	1. Determinar la vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas del acuífero costero Manglaralto mediante el método DRASTIC.	Procesamiento estadístico Estadísticos descriptivos: cálculo del DRASTIC vulnerability index y del DRASTIC-LQ vulnerability index. Prueba de contraste de hipótesis: Prueba de comparación Test de Wilcoxon.	
2. ¿Cuál es la vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas del acuífero costero Manglaralto mediante el método DRASTIC-LQ?	HE2. La vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas del acuífero costero Manglaralto calculada mediante el método DRASTIC indica una <i>vulnerabilidad alta</i> producto de los aportes de los factores recarga lateral (L) y la influencia de una recarga zonificada [(dique (Q))].	2. Determinar la vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas del acuífero costero Manglaralto mediante el método DRASTIC-LQ.		
3. ¿Qué similitudes y diferencias surgen al comparar los índices de vulnerabilidad del acuífero costero Manglaralto resultantes de la aplicación los métodos DRASTIC y DRASTIC-LQ?	HE3. Los índices de vulnerabilidad del acuífero costero Manglaralto resultantes de la aplicación los métodos DRASTIC y DRASTIC-LQ refleja una diferencia entre ambos siendo mayor el índice DRASTIC-LQ.	3. Comparar los índices de vulnerabilidad del acuífero costero Manglaralto resultantes de la aplicación los métodos DRASTIC y DRASTIC-LQ.		

Informe de originalidad Turnitin

Vulnerabilidad del acuífero costero Manglaralto mediante los métodos DRASTIC y DRASTIC-LQ

por Mg. Marco Antonio Arévalo Ulloa



Dr. DEZA NAVARRETE CARLOS ALBERTO
CÓDIGO ORCID: 0000-0003-0592-1821
ASESOR

Fecha de entrega: 06-oct-2022 09:04p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 1918782636

Nombre del archivo: TESIS_MARCO_AR_VALO_2022-1.docx (4.37M)

Total de palabras: 15621

Total de caracteres: 87947


Vulnerabilidad del acuífero costero Manglaralto mediante los métodos DRASTIC y DRASTIC-LQ

INFORME DE ORIGINALIDAD

10%	10%	1%	1%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	www.dspace.espol.edu.ec Fuente de Internet	2%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
3	repositorio.untumbes.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	rus.ucf.edu.cu Fuente de Internet	<1%
5	ri.uaemex.mx Fuente de Internet	<1%
6	zaguan.unizar.es Fuente de Internet	<1%
7	einstein.univalle.edu.co Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.imta.mx Fuente de Internet	<1%
9	www.osteopatiamadri.com.br Fuente de Internet	


Dr. DEZA NAVARRETE CARLOS ALBERTO
CÓDIGO ORCID: 0000-0003-0592-1821
ASESOR

		<1 %
10	docplayer.es Fuente de Internet	<1 %
11	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
12	purl.org Fuente de Internet	<1 %
13	oa.upm.es Fuente de Internet	<1 %
14	asgmi.igme.es Fuente de Internet	<1 %
15	gidahatari.com Fuente de Internet	<1 %
16	Submitted to Universidad Nacional de Tumbes Trabajo del estudiante	<1 %
17	eprints.ucm.es Fuente de Internet	<1 %
18	tesis.usat.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
19	repositorio.ug.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
20	linguatools.de Fuente de Internet	


 Dr. DEZA NAVARRETE CARLOS ALBERTO
 CÓDIGO ORCID: 0000-0003-0592-1821
 ASESOR

		<1 %
21	repositorio.ucm.edu.co Fuente de Internet	<1 %
22	doczz.com.br Fuente de Internet	<1 %
23	hosting.diputados.gob.mx Fuente de Internet	<1 %
24	info.igme.es Fuente de Internet	<1 %
25	colaboracion.dnp.gov.co Fuente de Internet	<1 %
26	moam.info Fuente de Internet	<1 %
27	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
28	ribuni.uni.edu.ni Fuente de Internet	<1 %
29	www.acodal.org.co Fuente de Internet	<1 %
30	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1 %
31	www.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %


 Dr. DEZA NAVARRRTE CARLOS ALBERTO
 CÓDIGO ORCID: 0000-0003-0592-1821
 ASESOR

32 repositorio.cepal.org
Fuente de Internet

<1 %

33 repositorio.untrm.edu.pe
Fuente de Internet

<1 %

Excluir citas Activo

Excluir coincidencias < 15 words

Excluir bibliografía Activo


Dr. DEZA NAVARRETE CARLOS ALBERTO
CÓDIGO ORCID: 0000-0003-0592-1821
ASESOR