

Applied Geology to the Design of Handcrafted Dikes (Tapes) and its Impact in the Recharge of the Manglaralto Coastal Aquifer, Santa Elena, Ecuador

Paúl Carrión-Mero, Ph.D.^{1,2}, Fernando Morante-Carballo, Ph.D.^{1,3,4}, Marco Varas, MSc.⁵, Gricelda Herrera-Franco, Ph.D.⁶, Josué Briones-Bitar, Ing.^{1,2}, Jenifer Malavé-Hernández, Ing.⁷, Iván Fajardo-González, Ing.⁸, John Campoverde-Cabrera, Ing.⁸

¹ Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Centro de Investigaciones y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra (CIPAT), Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador. pcarrión@espol.edu.ec, briones@espol.edu.ec

² Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería Ciencias de la Tierra (FICT), Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador.

³ Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Geo-recursos y Aplicaciones (GIGA), Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador. fmorante@espol.edu.ec

⁴ Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas (FCNM), Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador.

⁵ Universidad de Guayaquil, Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas, Carrera de Ingeniería Civil, Campus Ciudadela Universitaria, Guayaquil, Ecuador.

⁶ Universidad Estatal Península de Santa Elena, UPSE, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Av. Principal Santa Elena-La Libertad, Ecuador. grisherrera@upse.edu.ec

⁷ Junta Administradora Regional de Agua Potable de Manglaralto, JAAPMAN, Ecuador. jamalave@espol.edu.ec
⁸ Ingeniería Industrial, Civil y Geológica, IAF, Ecuador. fajardoivan93@gmail.com

Abstract— North of the Santa Elena province, the Manglaralto parish is located. Its population is primarily supplied by the groundwater extraction by wells, located on the alluvial terrace of the Manglaralto River. The lack of rainfall, the increase of inhabitants and tourism in the last decade, has caused a decrease in levels of the aquifer, leading to seek alternatives for recharging. Rescuing ancestral knowledge is emerging as an option for innovation with “tapes” (artisanal dikes) that allow taking advantage of the seasonal passage of surface water through the Manglaralto River, and at the same time creating conditions for the artificial recharge of the aquifer. The aim of this study was to optimize the location of “tapes” by analyzing geological, geotechnical and hydrological information to obtain the greatest surface accumulation of water and improvement in artificial recharge in the context of aquifer sustainability.

The methodology used in the study was: i) Information analysis of the Manglaralto basin and aquifer, ii) Field and laboratory work in relation to the topography and geology of the area and interpretation of the information obtained in field and laboratory, and, iii) Proposal for the location of the axis of a “tape” for optimum water recharge and storage. The results show that the lower part of the sub-basin of the Manglaralto River has greater thicknesses of the aquifer unit so that there will be greater accumulation of water, so 5 favorable places for artisanal tapes have been proposed, from these an optimal place was chosen with a height of 3 meters the dike would lead a volume of 4.641,88 m³.

Keywords— Ancestral knowledge, Applied geology, Artificial recharge, Coastal aquifer, Tape.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.307>
ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

GEOLOGÍA APLICADA AL DISEÑO DE DIQUES ARTESANALES (TAPES) Y SU INCIDENCIA EN LA RECARGA DEL ACUÍFERO COSTERO DE MANGLARALTO, SANTA ELENA, ECUADOR.

Paúl Carrión-Mero, Ph.D.^{1,2}, Fernando Morante-Carballo, Ph.D.^{1,3,4}, Marco Varas, MSc.⁵, Gricelda Herrera-Franco, Ph.D.⁶, Josué Briones-Bitar, Ing.^{1,2}, Jenifer Malavé-Hernández, Ing.⁷, Iván Fajardo-González, Ing.⁸, John Campoverde-Cabrera, Ing.⁸

¹ Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Centro de Investigaciones y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra (CIPAT), Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador. pcarrion@espol.edu.ec, briones@espol.edu.ec

² Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería Ciencias de la Tierra (FICT), Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador.

³ Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Geo-recursos y Aplicaciones (GIGA), Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador. fmorante@espol.edu.ec

⁴ Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas (FCNM), Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador.

⁵ Universidad de Guayaquil, Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas, Carrera de Ingeniería Civil, Campus Ciudadela Universitaria, Guayaquil, Ecuador.

⁶ Universidad Estatal Península de Santa Elena, UPSE, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Av. Principal Santa Elena-La Libertad, Ecuador. grisherrera@upse.edu.ec

⁷ Junta Administradora Regional de Agua Potable de Manglaralto, JAAPMAN, Ecuador. jamalave@espol.edu.ec

⁸ Ingeniería Industrial, Civil y Geológica, IAF, Ecuador. fajardoivan93@gmail.com

Resumen– Al norte de la provincia de Santa Elena, se ubica la parroquia Manglaralto. Su población se abastece primordialmente de la extracción de agua subterránea por pozos, ubicados sobre la terraza aluvial del río Manglaralto. La escasez de precipitaciones, el aumento de habitantes y de turismo en la última década, ha provocado una disminución en los niveles del acuífero, lo que conlleva a buscar alternativas para la recarga. El rescate del conocimiento ancestral se perfila como una opción para la innovación con “tapes” (diques artesanales) que permitan aprovechar el paso estacional del agua superficial a través del río Manglaralto, y al mismo tiempo crear condiciones para la recarga artificial del acuífero. El objetivo del trabajo consistió en optimizar la ubicación de “tapes” mediante análisis de información geológica, geotécnica e hidrológica para la obtención de la mayor acumulación superficial de agua y mejoramiento en la recarga artificial en el contexto de la sostenibilidad del acuífero. La metodología seguida en el trabajo fue: i) Análisis de la información de la cuenca y del acuífero Manglaralto, ii) Trabajo de campo y de laboratorio en relación a la topografía y geología del sector e interpretación de la información obtenida en campo y laboratorio, y, iii) Propuesta de ubicación del eje de un tape para una óptima recarga y almacenamiento de agua. Los resultados muestran que la parte baja de la subcuenca del río Manglaralto poseen mayores espesores de la unidad acuífera por lo que se tendrá mayor acumulación de agua, por lo que se han propuesto 5 lugares propicios para tapes artesanales, de estos se escogió un óptimo lugar con una altura de 3 metros el dique encausaría un volumen de 4.641,88 m³.

Palabras claves– Acuífero costero, Geología aplicada, Recarga artificial, Conocimiento ancestral, Tape.

Abstract– North of the Santa Elena province, the Manglaralto parish is located. Its population is primarily supplied by the groundwater extraction by wells, located on the alluvial terrace of the Manglaralto River. The lack of rainfall, the increase of inhabitants and tourism in the last decade, has caused a decrease in levels of the aquifer, leading to seek alternatives for recharging. Rescuing ancestral knowledge is emerging as an option for innovation with “tapes” (artisanal dikes) that allow taking advantage of the seasonal passage of surface water through the Manglaralto River, and at the same time creating conditions for the artificial recharge of the aquifer. The aim of this study was to optimize the location of “tapes” by analyzing geological, geotechnical and hydrological information to obtain the greatest surface accumulation of water and improvement in artificial recharge in the context of aquifer sustainability. The methodology used in the study was: i) Information analysis of the Manglaralto basin and aquifer, ii) Field and laboratory work in relation to the topography and geology of the area and interpretation of the information obtained in field and laboratory, and, iii) Proposal for the location of the axis of a “tape” for optimum water recharge and storage. The results show that the lower part of the sub-basin of the Manglaralto River has greater thicknesses of the aquifer unit so that there will be greater accumulation of water, so 5 favorable places for artisanal tapes have been proposed, from these an optimal place was chosen with a height of 3 meters the dike would lead a volume of 4.641,88 m³.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.309>

ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

Keywords— *Ancestral knowledge, Applied geology, Artificial recharge, Coastal aquifer, Tape.*

I. INTRODUCCIÓN

A. Generalidades

De acuerdo a [1], la recarga es un proceso a través del cual a un acuífero se incorpora agua de procedencia externa al contorno que lo limita. [2] define a este proceso como la circulación descendente del agua infiltrada en exceso desde la zona radicular, atravesando la zona no saturada hasta el nivel freático.

En regiones como las semiáridas, donde los recursos hídricos superficiales son escasos, la recarga artificial de acuíferos o por influencia humana, está experimentando un uso creciente por las grandes ventajas que conlleva [3].

En las zonas rurales de la Península de Santa Elena-Ecuador, donde no se cuenta con agua potable y el recurso hídrico es extraído de acuíferos, sus habitantes han venido desarrollando técnicas ancestrales para el cuidado y preservación del agua, a través de la recarga artificial, que comprende obras de carácter artesanal y técnico artesanal como tapes o diques, para represar el agua en ciertas zonas del cauce del río, para que de esta forma se recupere el nivel del agua en el subsuelo [4].

Un dique, conocido ancestralmente como tape, corresponde a la denominación dada por los comuneros a la acumulación de rocas y sedimentos en ciertas partes del cauce del río para tratar de represar el agua o permitir su acumulación [4].

La parroquia rural de Manglaralto de la Península de Santa Elena, conformada por las comunidades de Manglaralto, Montañita, Río Chico, Cadeate, San Antonio y Libertador Bolívar, debe su abastecimiento de agua al acuífero costero de Manglaralto. Pero, con el paso del tiempo, el aumento de la población y la escasez de lluvia, han provocado un descenso en el nivel freático de los pozos [5].

La Junta Administradora de Agua Potable de Manglaralto (JAAPMAN), entidad que gestiona el recurso hídrico en la parroquia, ha construido sus diques artesanales en base a conocimientos ancestrales y métodos de prueba y error, determinando zonas preferenciales para la construcción de los tapes en el cauce del río, las cuales cumplen las características de tener una anchura menor, para la optimización de recursos de construcción; y de estar ubicadas donde el cauce del río esté constituido por material aluvial, para favorecer la infiltración del agua [6-7].

B. Área de estudio

La provincia de Santa Elena se ubica al oeste del Ecuador, limitando, al norte con la provincia de Manabí, al sur y al este con la provincia del Guayas y al oeste con el Océano Pacífico. Ésta se divide en tres cantones: Santa Elena, Salinas y La Libertad. El cantón Santa Elena está integrado por 7

parroquias: Manglaralto, Colonche, Simón Bolívar, Santa Elena, Chanduy, Atahualpa y San José de Ancón. (Fig. 1).



Fig. 1 Mapa de ubicación de la parroquia de Manglaralto, Santa Elena.

El área de estudio comprende la Subcuenca del Río Manglaralto que pertenece al conjunto de subcuencas que conforman la Cuenca de Manglaralto. Ésta se ubica en la parroquia de Manglaralto, dentro del cantón Santa Elena. (Fig. 2).

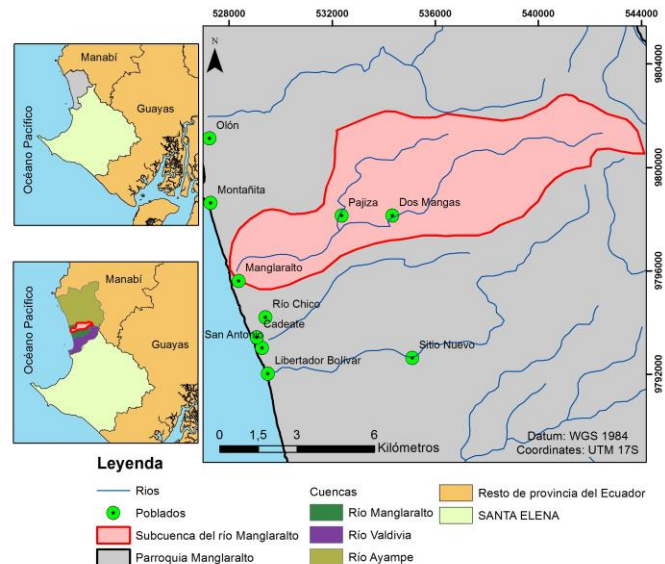


Fig. 2 Ubicación de la subcuenca del río Manglaralto (Zona de estudio) en la cuenca de Manglaralto. Modificada de [8-9].

C. Planteamiento del problema

Dentro del área de estudio existen tres acuíferos: Manglaralto, Cadeate y Simón Bolívar, que poseen en conjunto un volumen calculado de agua de 23'816.282 m³, del cual aproximadamente el 56% corresponde al acuífero costero de Manglaralto [10].

El balance hídrico del suelo de la cuenca de Manglaralto presenta un déficit anual de 661,7 mm con una

evapotranspiración (ETP) de 1.248,3 mm, frente a una precipitación promedio anual de 389,6 mm, siendo esto un indicativo de que la mayoría del agua proveniente de las precipitaciones en el sector es evapotranspirada. A raíz de ello, el acuífero sólo se recarga por los aportes de las precipitaciones durante la estación lluviosa, sin existir recarga en la estación seca. Por otro lado, se tiene una tasa de crecimiento anual en la descarga o en el consumo de agua del acuífero del 30%, con una recarga de apenas el 21% durante las precipitaciones anuales, con lo que se estima que el máximo volumen extraíble del acuífero de Manglaralto se agotaría en cuatro años. Mientras no se considere ningún tipo de recarga artificial [10-11].

Dada la problemática en cuanto a escasez de lluvias y al agotamiento del recurso subterráneo por la explotación de agua sin una adecuada recarga del acuífero, los diques (“tapes”) se muestran como una solución temporal y económicamente viable para poder encausar el agua en el invierno, con el fin de satisfacer las necesidades de la población durante la época de escasez. Pero, los diques construidos artesanalmente hasta el momento, suelen fallar en el invierno, teniendo una duración apenas temporal, por ello, se busca que los diques sean construidos combinando los conocimientos ancestrales con los de ingeniería, para lograr así un mejor aprovechamiento del recurso hídrico.

Por lo que el objetivo del trabajo consistió en optimizar la ubicación de “tapes” mediante análisis de información geológica, geotécnica e hidrológica para la obtención de la mayor acumulación superficial de agua y mejoramiento en la recarga artificial en el contexto de la sostenibilidad del acuífero.

II. METODOLOGÍA

La metodología seguida se dividió en tres fases (Fig. 3), siendo:

Fase I: Análisis de la información existente. - Esta primera parte constó de una recolección y revisión bibliográfica, en lo que se recogió: datos de proyectos anteriormente ejecutados, artículos y publicaciones, tesis de grado o posgrado, publicaciones en base de datos científicas relacionadas con el tema a tratar, datos de instituciones gubernamentales sobre el sector de estudio, encuestas, mapas y otras informaciones disponibles. El fin, de esta recolección y revisión, es la de formar una base de datos que nos proporcionó un punto de partida para su posterior análisis y propuesta de las estrategias.

Fase II: Trabajos de campo y laboratorio. - En este apartado se realizaron tres actividades principales:

Análisis de factibilidad para la ubicación de diques: se evalúa la cuenca del río Manglaralto mediante los siguientes parámetros: geomorfología y geología, hidrogeología e hidrología y recarga al acuífero. Esto se realizó tomando en cuenta la información recopilada de la Fase I.

Trabajos de campo: en estos recorridos de campo, se planificaron actividades de topografía, para la obtención de un

modelo digital del terreno (MDT) gracias a un Sistema de Información Geográfica (SIG); y gracias al MDT, se programaron los sitios para la toma de muestras de suelos, para en una posterior actividad analizarlas según ensayos en condiciones de laboratorio.

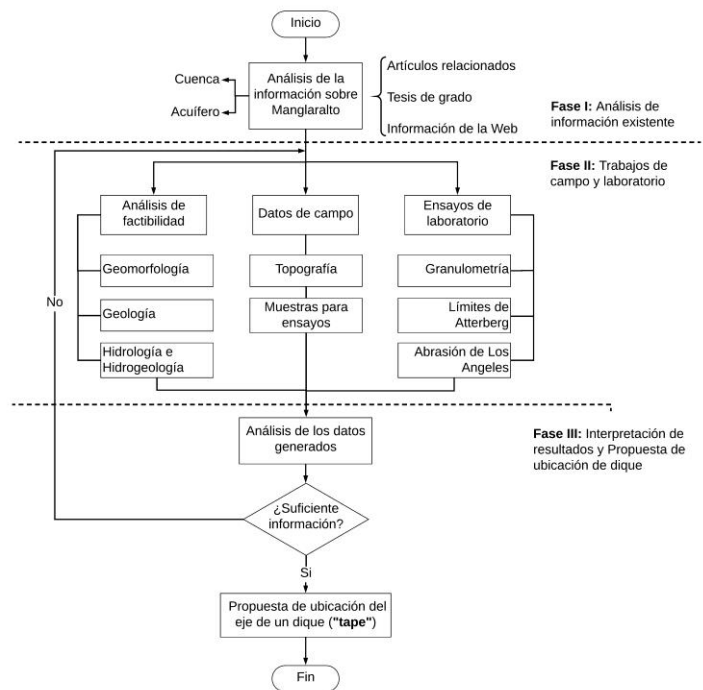


Fig. 3 Esquema de la metodología de estudio.

Ensayos en condición de laboratorio: a las muestras de suelos tomadas en la actividad anterior se les realiza ensayos en condiciones de laboratorio, datos necesarios para saber la calidad y caracterización del suelo presente; además, de darnos sitios para la posible ubicación de los diques (“tapes”). Los ensayos a realizar fueron: granulometría, límites de Atterberg, Triaxial U.U y abrasión de los Ángeles

Fase III: Interpretación de resultados y Propuesta de ubicación de dique. - Esta fase comprendió el análisis e interpretación de los datos obtenidos en campo y laboratorio. Con esto es posible ubicar las zonas favorables para la construcción de tapes, proponer esta alternativa de solución a la JAAPMAN.

III. RESULTADOS

A. Información geomorfológica, hidrogeológica y tectónica del área de estudio

En la Tabla I, se presenta y recopila la información basada en la descripción geomorfológica, hidrogeológica y tectónica de varios autores sobre área de estudio [12], [13], [14].

TABLA I
 INFORMACIÓN GEOMORFOLÓGICA, HIDROGEOLÓGICA Y TECTÓNICA DEL
 ÁREA DE ESTUDIO. MODIFICADO DE [9].

Geomorfología (Relieve y Pendientes)	<p>Se evidencian tres dominios morfo-estructurales:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Montañas en un rango de altitudes de 300 a 750 m.s.n.m., con profundos surcos tipo V debido a la dinámica fluvial. -Valles extensos al centro de la subcuenca con suave inclinación, desarrollados entre colinas de entre 100 y 300 m.s.n.m. -Terrazas aluviales de plataforma extensa, con dimensiones horizontales de entre 500 y 1000 m. -Se observan pendientes fuertes hacia el noreste y moderadas a bajas hacia el sureste. (Fig. 4)
Hidrogeología	<p>Características hidrogeológicas</p> <ul style="list-style-type: none"> -El río Manglaralto posee depósitos aluviales recientes formados por gravas y arenas, con buenas condiciones de porosidad y permeabilidad para acumular aguas subterráneas. -Y subyaciendo, la Fm. Socorro del Grupo Ancón y el Miembro Dos Bocas de la Fm. Tosagua, que poseen estratos arcillosos, y arcillas limosas y lutitas, respectivamente, siendo capas impermeables que favorecen el entrapamiento del agua. -Existe un acuífero somero semiconfinado en los depósitos aluviales del Río Manglaralto, que de acuerdo a análisis de niveles de pozos poseen un nivel freático promedio de entre 9 y 17 m, y una zona saturada que alcanza ~20 m de profundidad [15]. -La porosidad del acuífero de Manglaralto se encuentra entre el 20 al 30%, la permeabilidad entre 1,59 – 5,15 m/día, la transmisividad entre 30-128 m²/día y el coeficiente de almacenamiento se mantiene con un valor de 0,002 [16]. <p>Unidades Hidrogeológicas</p> <ul style="list-style-type: none"> -Existen 3 unidades hidrogeológicas en el área de estudio. La unidad semi-confinante, la unidad acuífera y la confinante. (Tabla II) <p>Geometría del Acuífero</p> <p>Se analizan 3 zonas para los estudios de [11], las cuales corresponden a los espesores de las diferentes unidades hidrogeológicas en el acuífero del río Manglaralto (Fig. 5).</p> <ul style="list-style-type: none"> -Zona 1: Es la zona suroeste del acuífero, comprende desde el Océano Pacífico hasta la zona de Pomarosa, donde existe la mayoría de pozos explotados y administrados por la JAAPMAN. Los espesores hallados para la unidad semiconfinante son de 6 y 22m, y para la unidad acuífera son de 14 a 30m. -Zona 2: Es la zona céntrica del acuífero, comprende desde Pomarosa hasta Pajiza. La unidad semiconfinante posee espesores de 6 a 12m, mientras que, el espesor de la unidad acuífera va de 18 a 3m, disminuyendo hacia el noreste a la altura de Pajiza, donde hay menor probabilidad de explotación de pozos. -Zona 3: Es la zona noreste del acuífero, comprende desde Pajiza hasta Dos Mangas, y es la más alta del aluvial, entre 77 y 100 m.s.n.m. El espesor de la unidad confinante es de ~2m, y para la unidad acuífera, de 3 a 18 m, aumentando hasta la altura de Dos Mangas, y disminuyendo hasta 3m al alejarse del poblado.
Tectónica	<p>La subcuenca del Río Manglaralto está atravesada por varias fallas definidas por [14], de movimiento vertical predominante con orientación NW-SE o NNW-SSE, y de desplazamiento de rumbo y de cizalla, como las fallas de La Rinconada, Punta Montañita, La Entrada y Río Manglaralto de dirección NE-SW, relacionadas con la segunda fase de la orogénesis de Los Andes (Fig. 6).</p>

-Hacia el centro de la cuenca existe otra familia de fallas de dirección N-S, fruto de la tectónica de plegamiento en el sinclinal del río Piñas, y se desarrolla hacia el norte de la Cordillera Chongón-Colonche.
 -Dos secciones de fallas de la Falla Colonche (sur de la cordillera Chongón-Colonche) son las más cercanas a la cuenca de Manglaralto, siendo norte y noroeste. La sección noroeste se extiende en dirección N44°W en una longitud aproximada de 10,5 km, formando una leve traza curva, lo que sugiere fallamiento de tipo inverso. La sección norte se extiende en dirección N39°W en una longitud aproximada de 24,1 km, con movimiento inverso a transpresional.

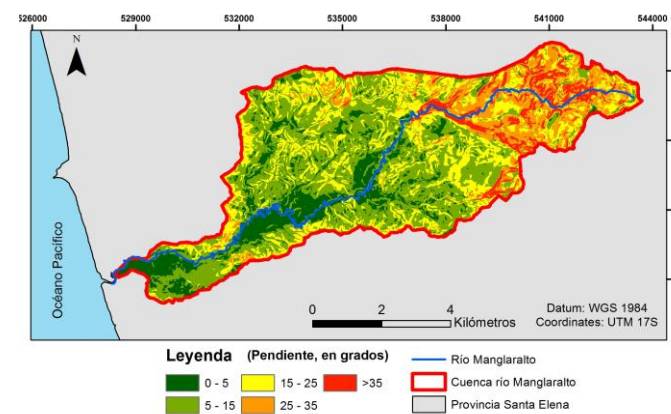


Fig. 4 Mapa de Pendientes de la Subcuenca del Río Manglaralto.
 Modificada de [9].

TABLA II
 ESPECIFICACIONES DE UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS DEFINIDAS EN LA
 SUBCUENCA DEL RÍO MANGLARALTO

Unidades hidrogeológicas	Términos lito-estratigráficos	Características
Unidad semiconfinante	Limos arenosos, arcillas, arenas y gravas	-Acuitardo -Distintos valores de permeabilidad -Libre o semiconfinante
Unidad acuífera	Grava, gravilla	-Acuífero superior -Permeable
Unidad de base confinante	Arcilla limosa	-Acuicluido -Considerado permeable

B. Análisis de factibilidad para la ubicación de diques

Partiendo de la información geomorfológica, hidrogeológica y tectónica del área de estudio en la Tabla I y II, se procede a realizar el análisis de factibilidad para la ubicación de diques, la cual se realizará en la Tabla III. El objeto de análisis es la subcuenca del Río Manglaralto (Fig. 5) y será dividida en 3 partes, esto es Subcuenca: Alta, media y baja indicando que con alto nos referimos a la parte que se encuentra al extremo este y con bajo al extremo oeste de la subcuenca.

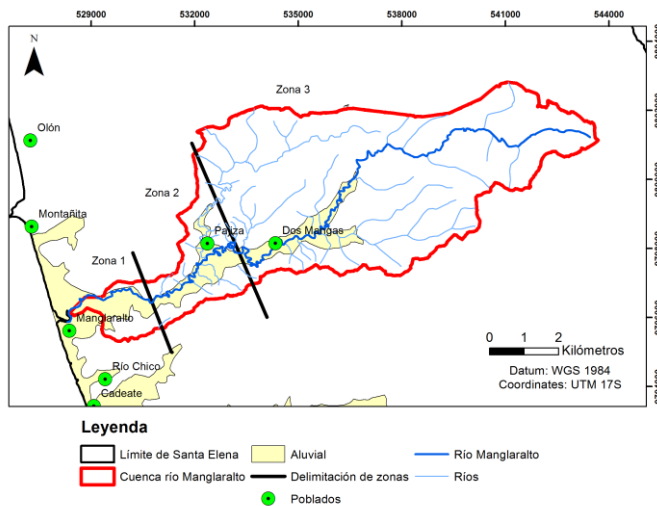


Fig. 5 Mapa del aluvial asociado al acuífero costero de Manglaralto. Modificado de [11].

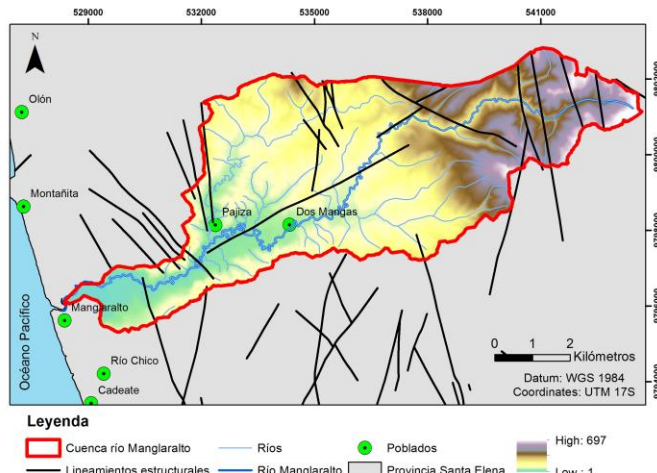


Fig. 6 Mapa de los lineamientos estructurales de la Subcuenca del Río Manglaralto. Modificada de [9].

TABLA III
ANÁLISIS GEOLÓGICO-GEOMORFOLÓGICO, HIDROLÓGICO-
HIDROGEOLÓGICO Y DE RECARGA PARA LA UBICACIÓN DEL DIQUE.
ELABORADA EN BASE A [9].

<p>Análisis geológico-geomorfológico</p>	<p>Se dividió a la subcuenca del Río Manglaralto en 3 partes: alta, media y baja (Fig. 7).</p> <p>-Subcuenca Alta: pendientes moderadas (~15°) a verticales (>35°), predominando en un 25% las pendientes fuertes. Tal morfología se relaciona a la presencia de rocas de la Fm. Cayo, comprendida por limolitas y areniscas gruesas, tobas, lutitas, hialoclastitas, calizas y brechas volcánicas sedimentos duros y resistentes a la erosión. Por tal, en esta parte existe una leve erosión y depósitos aluviales de baja potencia.</p> <p>-Subcuenca Media: pendientes suaves a fuertes, predominando las suaves en un 60%. Predominan rocas de la Fm. Socorro, que presenta en su tope limolitas y lutitas, con intercalaciones de areniscas y arcillas. Estas rocas son</p>
---	--

	<p>semiduras y están fracturadas debido a esfuerzos compresionales, siendo propicias para la deposición de los materiales provenientes del noreste del Río Manglaralto.</p> <p>-Subcuenca Baja: comprende pendientes suaves a moderadas, siendo el depocentro de los materiales que vienen de la subcuenca media y alta. Está constituida superficialmente por gravas y conglomerados brechosos, en una matriz limo-arcillosa que suprayace a la Fm. Tosagua. En base a esto, se obtiene que el espesor del depósito aluvial aumenta hacia la parte baja de la subcuenca, y que las parte media y alta se caracterizan por una baja porosidad y permeabilidad, siendo inadecuadas para la retención de suficiente cantidad de agua para considerarlas acuífero.</p>
<p>Análisis hidrogeológico</p>	<p>-De acuerdo al mapa de espesores de la unidad acuífera de [11], la zona 1 corresponde a la de mayor espesor (14-30 m), versus las zonas 2 y 3 que van de 3-18 m.</p> <p>-La recarga natural de agua para el acuífero se estima en un 21%, según [11]</p>
<p>Recarga</p>	<p>-El promedio anual de la precipitación en el acuífero en la parte baja es de 300 mm/año y en la parte alta es aproximadamente el doble de la parte baja.</p> <p>Se tiene una tasa de recarga de 164 mm/año en la parte baja y de 274 mm/año en la parte alta.</p>

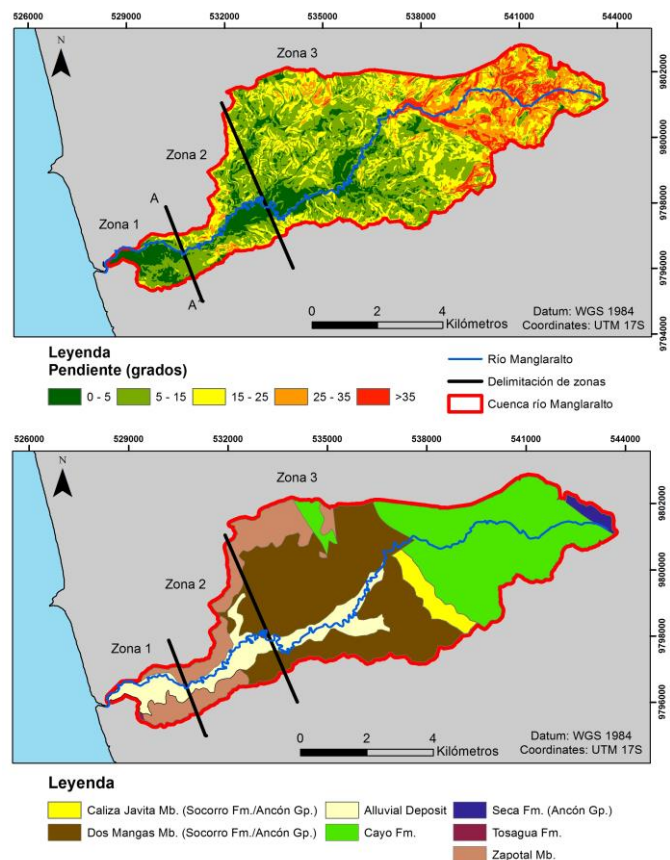


Fig. 7 Relación entre la geomorfología de la subcuenca y su geología. Modificada de [9].

De acuerdo a lo anterior, cada zona de la subcuenca de Manglaralto presenta las características mostradas en la Tabla IV, las mismas que definen su carácter positivo o negativo para la recarga.

TABLA IV

RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS, GEOLÓGICAS, HIDROLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS DE LAS TRES ZONAS DE LA SUBCUENCA DE MANGLARALTO.

Zona	Geomorfología y Geología	Hidrología e Hidrogeología	Recarga
1	-Pendientes suaves a moderadas. Constituida superficialmente por gravas y conglomerados brechosos, en una matriz limo-arcillosa que suprayace a la Fm. Tosagua. -Depósitos aluviales de alta potencia.	-Unidad semiconfinante (6-22 m) -Unidad acuífera espesor (14-30 m)	Precipitación promedio anual de 164 mm/año
2	-Pendientes suaves a fuertes, predominando las suaves en un 60%. -Predominan rocas de la Fm. Socorro, que presenta en su tope limolitas y lutitas, con intercalaciones de areniscas y arcillas. -Depósitos aluviales de media potencia.	--Unidad semiconfinante (6-12 m) -Unidad acuífera espesor (3-18 m)	Precipitación promedio anual de 200 mm/año
3	-Pendientes moderadas (~15°) a verticales (>35°), predominando en un 25% las pendientes fuertes. -Rocas de la Fm. Cayo, comprendida por limolitas y areniscas gruesas, tobas, lutitas, hialoclastitas, calizas y brechas volcánicas sedimentos duros y resistentes a la erosión. -Depósitos aluviales de baja potencia.	--Unidad semiconfinante de ~2m -Unidad acuífera espesor (3-18 m)	Precipitación promedio anual de 274 mm/año

C. Determinación de sitios favorables para la ubicación de diques

Las alternativas para la ubicación de diques se enfocan a lo largo del río Manglaralto, al ser éste la única vía de recarga del acuífero de Manglaralto.

De acuerdo al mapa de zonas potenciales de agua subterránea de [10], existen 4 categorías de acumulación: muy alto, alto, moderado y bajo potencial. La Tabla V describe las características de las zonas de alto y bajo potencial.

En base al análisis de factibilidad se concluye que, la zona 1 es el área más favorable para la ubicación del dique (Fig. 8), ya que, al encontrarse en la subcuenca baja del río Manglaralto es la zona con mayor espesor de unidad acuífera (14-30 m) y con mayor precipitación media anual (500 mm³). Además, se determina que la mayoría de los pozos se ubican en esta zona, y que la ubicación del dique deberá ser cercana a donde exista la mayor cantidad de pozos para que se pueda tener un óptimo

aprovechamiento del aumento de los niveles del acuífero una vez construido el dique.

TABLA V

CARACTERÍSTICAS DE LAS ZONAS DE ALTO Y BAJO POTENCIAL DE AGUA SUBTERRÁNEAS.

Potencial de aguas subterráneas	Características
Alto Potencial	-Ubicadas en la subcuenca baja del río Manglaralto -Existe precipitación media anual de 500 mm ³ . -Coinciden con ser depósitos aluviales, zonas de cultivos, tener pendientes bajas y alta densidad de fallas.
Bajo Potencial	-Ubicada en la subcuenca alta del río Manglaralto. -Precipitación media anual de 350-400 mm ³ . -Zona semidesértica, ya que la evapotranspiración supera los 1200 mm ³ .

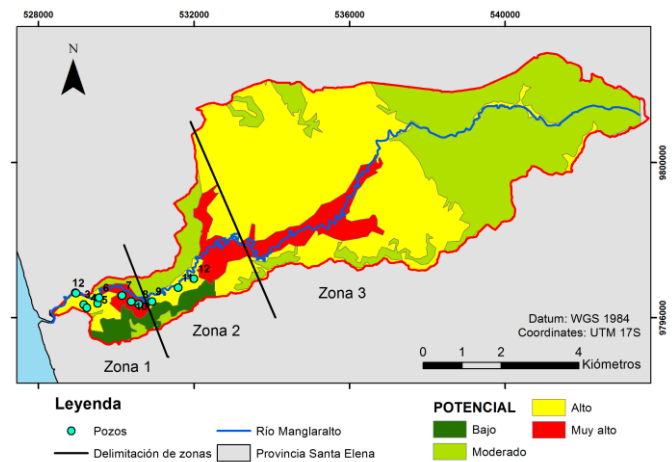


Fig. 8 Mapa de área favorable para la ubicación de diques en el Río Manglaralto. Modificada de [9], [10].

D. Selección del sitio para la ubicación del eje del dique en la Zona 1

Con el fin de analizar el sitio idóneo para la ubicación del dique, que sería donde la geomorfología del cauce permita gran acumulación de agua superficial, se realizó una visita técnica de campo a lo largo del río Manglaralto, en el tramo comprendido de la Zona 1 (Fig. 8 y Fig. 9).

A lo largo del río se debió encontrar una sección con los siguientes requerimientos:

- La morfología del cauce sea tal, que el volumen de agua que se almacena en el embalse sea considerable, con el objetivo de que ésta se infiltre al acuífero.
- La sección donde se construirá el dique sea lo más angosta posible, asegurando que la longitud del dique sea corta y se obtenga un menor costo en la obra.

De acuerdo a esto, se propusieron dos lugares para la ubicación del dique (ver Fig. 9), que debido a su morfología mostraban una considerable capacidad de embalse. La Tabla VI muestra las características de embalse y otros factores observados en campo para ambas propuestas.

En base a las observaciones de campo y la cercanía a pozos, se determinó la propuesta de ubicación 2, de

coordenadas UTM (17 M, 529.564,00 E; 9 796.588,00 m S), como la más factible, al ser una opción más viable en cuanto a tiempo y economía. Siendo este lugar, en el que se procedería con los estudios de campo y laboratorio para la determinación de la geometría del embalse.

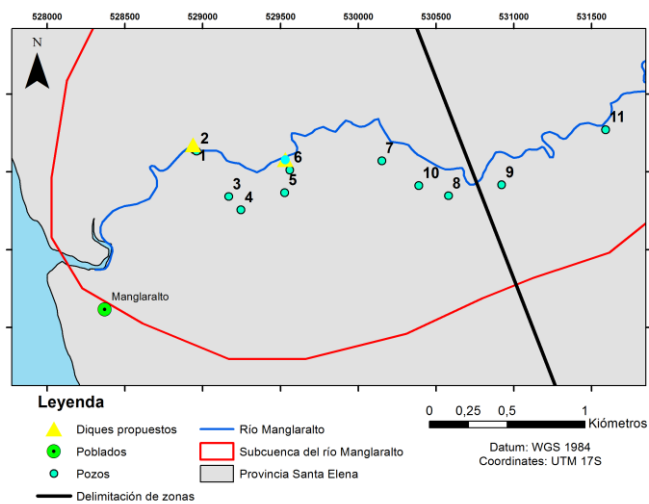


Fig. 9 Mapa de ubicación de diques propuestos respecto a los pozos situados a lo largo del río Manglaralto.

TABLA VI
Características de embalse y factores extra observados en campo en los lugares propuestos para la ubicación del dique. Modificada de [9].

Ubicación	Observaciones en campo	Pozos cercanos
1	-Mayor capacidad de embalse. -Permite acceso de maquinaria pesada para excavación. -Lejano de la carretera. -Mala recepción señal GPS. -Mayor área de muestreo. -Mayor costo de alquiler de maquinaria.	Pozo 2
2	-Menor capacidad de embalse. -Permite acceso de maquinaria pesada. -Cercano a la carretera. -Excelente recepción señal GPS. -Menor área de muestreo. -Bajo coste de alquiler de maquinaria.	Pozo 6

E. Recolección de datos en campo.

Definido el sitio más favorable para la ubicación del dique, se procedió a levantar la topografía a detalle para obtener la morfología del cauce. Además, se realizaron toma de muestras de suelo para ensayos en condiciones de laboratorio. La descripción de cada actividad realizada en campo, se encuentra en la Tabla VII.

TABLA VII
Resultados de la fase de campo en el sitio de ubicación del dique. Elaborado en base a [9].

Topografía del terreno	El levantamiento topográfico del área de embalse se realizó con un equipo GPS de alta precisión en tiempo real en la sección del río donde irá ubicado el dique y en la sección posterior a ésta, ubicando las coordenadas de los puntos donde se tomarán las muestras para los ensayos de suelos.
------------------------	--

Modelo Digital del Terreno (MDT) y obtención de curvas de nivel	-El Modelo Digital del Terreno (Fig. 10) se realizó en el software ArcMap utilizando los puntos tomados en el levantamiento topográfico. Con ello se obtuvo las curvas de nivel cada 0.5 m del área de embalse. A partir de las curvas obtenidas puede calcularse el volumen de agua que almacenará el dique.
Toma de muestras de suelos para ensayos	-Para realizar el dique de manera apropiada es necesario conocer las características del suelo en el sitio de ubicación, por lo cual, se tomaron muestras de suelo en los taludes donde se va a realizar el empotramiento del dique con el fin de realizar ensayos de caracterización del suelo por granulometría y límites de Atterberg, y ensayos triaxiales; y además en el área de embalse, para realizar ensayos de permeabilidad. El muestreo de los taludes se realizó mediante la técnica de calicatas y perforación con tubo Shelby, mientras que el del área de embalse se realizó por extracción con retroexcavadora a una profundidad de 2 m (Fig. 11).

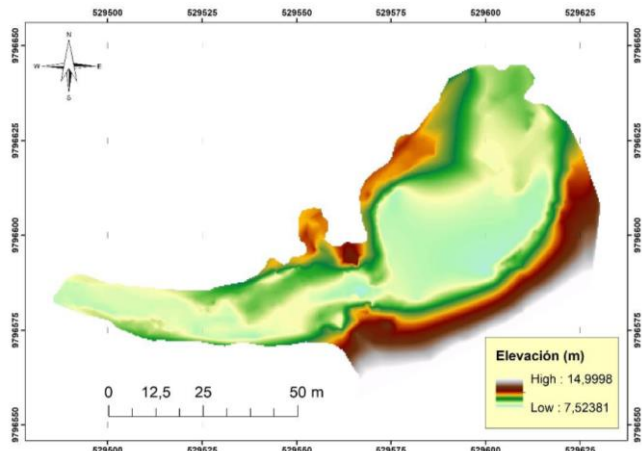


Fig. 10 Modelo Digital del Terreno del área de embalse en el lugar de ubicación del dique. Modificada de [9].



Fig. 11 A. Muestreo por calicata. B. Muestreo por perforación con tubo Shelby. C. Muestreo por extracción con excavadora.

F. Ensayos geotécnicos en laboratorio.

Las muestras de suelo fueron sometidas a cuatro ensayos: Granulometría y Límites de Atterberg para caracterización de suelos, Ensayo Triaxial U.U para determinación de cohesión y ángulo de fricción del material y Abrasión de Los Ángeles para determinar la resistencia a la abrasión o desgaste del material. Los resultados de estos ensayos se describen en la Tabla VIII.

TABLA VIII

Ensayos geotécnicos realizados en las muestras de suelo en el área de ubicación del dique. Elaborado en base a [9].

Granulometría	Se utilizó muestras representativas y homogéneas (material fino y grueso) que pasaron a través de tamices de diferentes diámetros, obteniendo como resultado que: -La muestra de talud derecho está compuesta por arena bien graduada con algo de limos. -La muestra del talud izquierdo es una mezcla de grava mal graduada con un porcentaje considerable de arena gruesa. -La muestra de excavación en el río corresponde a grava gruesa con un bajo porcentaje de finos. -La muestra tomada superficialmente en el centro del río consiste en grava, con una relación de 80% de grava gruesa y 20% de grava fina aproximadamente.
Límites de Atterberg	Se realizó únicamente en las muestras del talud derecho y talud izquierdo, obteniendo para la primera muestra valores de LL= 38.7, LP= 31.2, IP=7.4; y para la segunda muestra valores de LL= 62.04, LP= 43.73, IP= 18.31.
Ensayo Triaxial U.U	Se realizó únicamente en las muestras del talud izquierdo y derecho, obteniendo que: la primera muestra presenta una cohesión de 54,92 KPa y un ángulo de fricción de 37,23°, y la segunda muestra una cohesión de 348,07 KPa y un ángulo de fricción de 20,30°.
Abrasión de los Ángeles	Se ejecutó para examinar si el material a lo largo del río es factible como agregado para el hormigón que revestirá el dique. Como resultado se obtuvo que, el porcentaje de desgaste es de 32.82%, que es un valor inferior al máximo desgaste permitido (40%) por la ASTM C131 y ASTM A535; por lo que se determina que el material es factible como agregado grueso para la elaboración de un hormigón con una dosificación tal, que adquiera una resistencia cercana a 280 kg/cm².

G. Propuesta de ubicación del eje de dique.

La morfología del terreno donde se propone ejecutar el proyecto es ideal, al contar con un amplio embalse para maximizar el área aportación y un cuello estrecho para minimizar el costo de la obra. En la Tabla IX, se presenta la recopilación de la información sobre la geometría del dique y el volumen de agua superficial embalsada.

TABLA IX

Resultados de la geometría del dique y el volumen de agua superficial de embalse. Elaborado en base a [9].

Geometría del dique	La geometría del dique depende directamente de la topografía del terreno y comprende tanto longitud, como altura. Se analiza que la altura del dique no debe ser mayor que la permitida por el cuello del embalse, ya que, de otra forma, el agua escurrirá por los laterales del dique. Y, que la longitud debe ser lo más angosta posible para minimizar costos y debe contar con un empotramiento en el terreno natural. En base a este análisis en las curvas de nivel, se determina que la curva de nivel más alta y continua que existe en ambos lados del cauce del río es de 3.5 m, y que la cota más baja es inferior a 1 m, por lo que se elige una cota inferior de 0.5 m. La altura del dique consiste en la diferencia entre las cotas superior e inferior, obteniendo así un valor de 3 m. La longitud libre del dique se midió en la parte más angosta del embalse, obteniéndose un valor de 15.45 m.
Volumen de agua superficial en el	Para el cálculo del volumen de agua almacenada en el embalse se simuló un reservorio cerrado, delimitando el área de embalse en las curvas de nivel con el software ArcMap. Con la herramienta <i>Polygon Volumen</i> se calculó el volumen total

embalse

fijando una cota base, cuyo valor corresponde al nivel más bajo superficialmente en el cauce. El volumen total de agua almacenada en el reservorio es de aproximadamente 4641,88 m³ (Fig. 12).

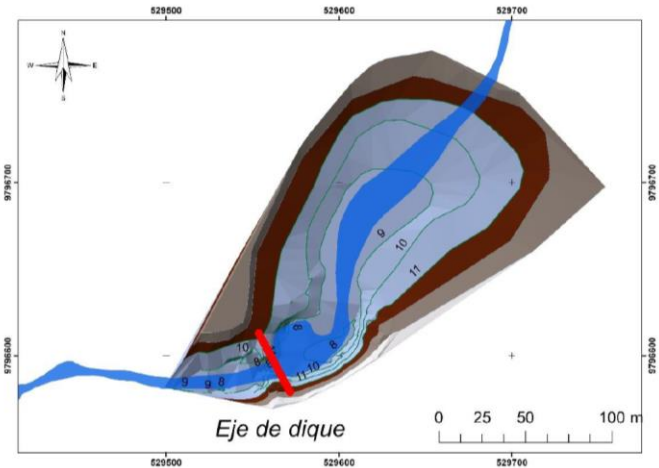


Fig. 12 Embalse de agua superficial según la morfología del terreno.

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Según los resultados de los apartados A (Información geomorfológica, hidrogeológica y tectónica del área de estudio), B (Análisis de factibilidad para la ubicación de diques) y C (Determinación de sitios favorables para la ubicación de diques), la mejor opción es la Zona 1 (según Fig. 5 y 8); ya que, presenta las mejores condiciones que permiten el almacenamiento de agua superficial y su infiltración de manera más eficiente; con lo que, se puede recargar el acuífero, según nos explican varios autores [9-10].

La elección en la Zona 1, de la subcuenca del río Manglaralto, es beneficio, por la infiltración al acuífero subterráneo, para la recarga de los pozos ubicados en esta Zona del río. Cercano al "tape" propuesto se encuentra el pozo 2 y 6, los cuales, se recargarían en las épocas de lluvia (de enero a mayo) como se observa en la Fig. 13 y lo expresan varios autores [4, 7, 10, 17].

Gracias a los datos recopilados en el apartado III.A (Información geomorfológica, hidrogeológica y tectónica del área de estudio), se sabe que el área, donde se plantea poner el "tape", existe una actividad sísmica media a alta, según se observa en la Fig. 14 y referencias de varios autores [9, 18,19]. Por eso el "tape" planteado será presa de tierra, de concreto del tipo gravedad o presas de enrocado. Hay que indicar que las fallas geológicas (Fig. 6) no son activas en el sector, más bien, estas nos ayudan a una mejor infiltración del agua al acuífero.

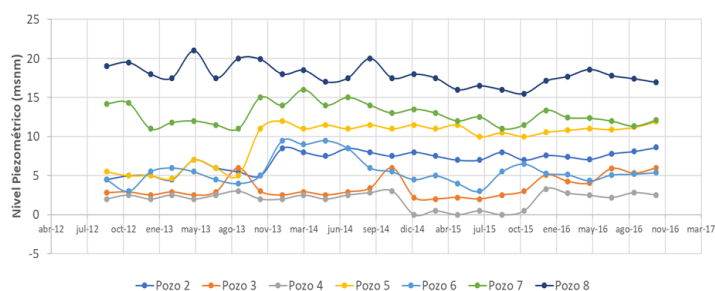


Fig. 13 Variación temporal del nivel piezométrico en pozos de agua adyacentes a los "tapes".

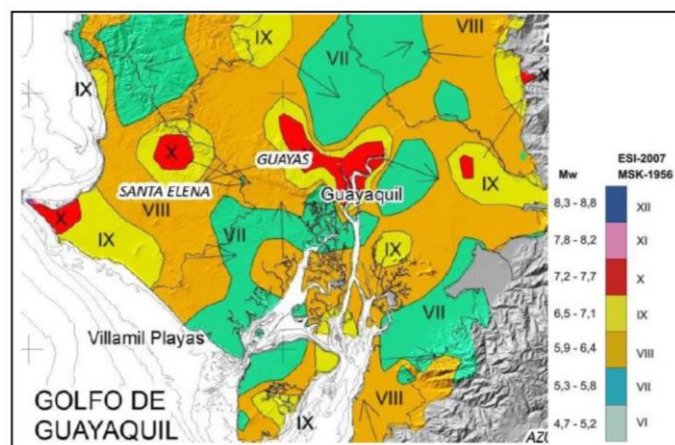


Fig. 14 Modelo de isosistas de máximas intensidades macrosísmicas estimadas desde análisis de fallas geológicas y de sismos. Modificada de [19].

De los resultados obtenidos de los ensayos de suelo, en condiciones de laboratorio, se puede indicar que la constitución del talud izquierdo y derecho, del río Manglaralto, es de arena fina y grava fina cohesiva, respectivamente, por eso se puede explicar que, los anteriores tapes hechos de gaviones hayan sido arrastrados por la corriente del río.

Por otro lado, la granulometría de grava del material superficial del río y los resultados del ensayo de Abrasión de Los Ángeles revelan que éste material puede ser usado como agregado para el hormigón que revestirá el "tape". Pero como indica [17], ciertas áreas del río son protegidas por las personas de la comunidad; esto, debido a que, si es sobreexplotado el material del río es posible que no se dé una correcta infiltración en ese lugar.

V. CONCLUSIONES

Se discriminó que las áreas más favorables para la ubicación del "tape" se encuentran en la subcuenca baja del río Manglaralto (específicamente cerca de los pozos 2 y 6), al ser una zona que coincide con gran volumen de depósitos aluviales, alta precipitación y densidad de fallas, favoreciendo la permeabilidad.

La ubicación del "tape" se seleccionó cerca del pozo 2 y 6, debido a factores de tiempo de construcción y económicos,

sitio para el cual se determinó una geometría del dique de 3 m de altura y 15,45 m de longitud libre; y se calculó una capacidad de almacenaje en volumen de agua superficial de $4.641,88 \text{ m}^3$.

Por lo que, gracias a los estudios y recolección de datos realizados en la Zona 1 del río Manglaralto, se ha optimizado la ubicación de un "tape"; con lo que se puede decir que, construcción de este "tape" es una opción factible para dar solución al problema de recarga del acuífero de Manglaralto y la escasez de agua en la parroquia.

El conocimiento ancestral ha proporcionado temporalmente una solución a uno de los principales problemas que tienen las comunidades de la Provincia de Santa Elena (PSE), especialmente en la parroquia de Manglaralto. Se puede confirmar la eficiencia de los "tapes" y la recarga artificial en el aumento de los niveles piezométricos de los pozos adyacentes a los "tapes".

AGRADECIMIENTO

Al Proyecto de la Unidad de Vínculos con la Sociedad de la ESPOL "Gestión integral del agua en cuencas hidrográficas de la Parroquia Manglaralto". Al Proyecto de Investigación "Registro de patrimonio geológico y minero y su incidencia en la defensa y preservación de la geodiversidad en el Ecuador".

REFERENCIAS

- [1] E. Custodio, "Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre," *Boletín Geológico y Minero*, vol. 109, no. 4, pp. 13-29, 1998.
- [2] R. Freeze & J. Cherry, *Groundwater*, 2nd ed., Englewood Cliffs: Prentice-Hall Ins., 1979, pp.604.
- [3] T. Rodríguez-Estrella, M. Martínez Lloris & A. Romero Díaz, "Utilización de diques de corrección hidrológica ya existentes para recarga de acuíferos y propuesta de otros nuevos en la Cuenca del Río Quípar (Sureste de España). Las aguas subterráneas en los países mediterráneos," *Hidrogeología y Aguas Subterráneas*, vol. 17, pp. 413-418, 2006.
- [4] P. Carrión, G. Herrera, G. Cordero, K. Erazo, K. Zambrano, and J. Limón, "Recarga Artificial de Acuíferos en Santa Elena, Experiencia de Origen Ancestral. Caso Manglaralto," unpublished.
- [5] K. Stothert, "Las albarradas tradicionales y el manejo de aguas en la Península de Santa Elena," *Boletín del Área Cultural del Banco Central del Ecuador*, vol. 8, no. 1, pp. 131-160, 1995.
- [6] K. Yapa, *Prácticas Ancestrales de Crianza de Agua: una guía de campo*, 1st ed., Guayaquil: ESPOL, 2013, p. 207.
- [7] P. Carrión, G. Herrera, J. Briones, C. Sánchez, and J. Limón, "Practical adaptations of ancestral knowledge for groundwater artificial recharge management of Manglaralto coastal aquifer, Ecuador.," *Sustainable Development and Planning X*, 1st ed.; Passerini, G., Marchettini, N., Eds.; WIT Press: UK, 2019; Volume 217, pp. 557-568, ISBN 978-1-78466-291-2.
- [8] Sistema Nacional de Información (SNI), Mapa del Ecuador, <https://sni.gob.ec/inicio>.
- [9] J. Campoverde & I. Fajardo, "Contribución de la Geología Aplicada para la Mejora en el Diseño de un Dique en la Subcuenca del Río Manglaralto, Provincia de Santa Elena" Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Ecuador, 2018.
- [10] J. Valencia, "Análisis Hidrogeológico de la Cuenca del Río Manglaralto para la Caracterización de sus Sistemas Acuíferos", Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Ecuador, 2017.
- [11] E. Merino, "Evaluación de la intrusión salina en un acuífero costero y el impacto al suministro de agua potable en Manglaralto provincia de Santa Elena," unpublished.

- Elena”, Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Ecuador, 2014.
- [12] E. Núñez del Arco, *Geología del Ecuador*, 1st ed., Guayaquil: ESPOL, 2003, pp. 253.
- [13] J. Amado, Estudio hidrogeológico de la cuenca baja del río Manglaralto, <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/3419/1/5942.pdf>
- [14] Instituto Geográfico Militar (IGM), Hoja Geológica de Manglaralto-Ecuador, https://drive.google.com/file/d/1HwCJFa_TzJHSMjq-SU0vM0mDY5U3Ax5h/view
- [15] M. Arévalo, “Propuesta de diseño de construcción, acondicionamiento de un pozo de agua y su incidencia en la vulnerabilidad del acuífero costero en Manglaralto” Tesis de maestría, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Ecuador, 2017.
- [16] CIPAT-ESPOL, “Estudios emergentes de prospección geoelectrica para determinar sitios de interés para la construcción de pozos de agua para las juntas regionales de Valdivia y Manglaralto,” unpublished.
- [17] G. Herrera, P. Carrión and J. Briones, “Prácticas de gestión para una comunidad sostenible y su incidencia en el desarrollo, Manglaralto-Santa Elena, Ecuador,” *17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Industry, Innovation, and Infrastructure for Sustainable Cities and Communities”*, 2019, ISBN 978-0-9993443-6-1.
- [18] Norma Ecuatoriana de la construcción-NEC-SE-DS, Peligro Sísmico/Diseño Sismo Resistente, <http://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/08/NEC-SE-DS.pdf>
- [19] K. Chunga, “Estudio de Geología de superficie del sitio Ciénega de la provincia de Santa Elena,” *PSE*, vol. 2, pp. 1-56, 2015.