

El potencial gasífero de la Formación Zapallal en el área Curumuy y la interferencia de un pozo hidrogeológico (cuenca Sechura, Perú)

Jul Roldán-Guevara^{1,2} ; Eduardo A. Rossello^{3*} 

¹Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco, Perú. julroldang@gmail.com

²Zeus Energy SAC, Piura, Perú.

³IGEBACONICET, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina. (*) ea_rossello@yahoo.com.ar

Resumen

La perforación del pozo hidrogeológico Alejandrina a los 209 m bbb, muy por debajo de la profundidad habitual de los pozos de agua de la zona, alcanzó un nivel arenoso de la Formación Zapallal con contenido gasífero inesperado que determinó un fuerte venteo, licuefacción de la plataforma de perforación, colapso del equipo de perforación y la contaminación de los niveles tradicionalmente productores del acuífero confinado. Para mitigar esta invasión de gas y surgencia a superficie, se perforaron los pozos: i) de alivio Papayal, para efectuar maniobras de captura y cementación donde se requirieron 5 intentos de perforación direccional hasta interceptar el pozo Alejandrina y ii) exploratorio Curumuy 1X para disminuir la presión de la invasión de gas y conocer sus posibles orígenes anormales a esas profundidades tan someras. El objetivo del trabajo es informar la estratigrafía de este sector potencialmente exploratorio con probada presencia de recursos de gas de la cuenca Sechura y describir la secuencia de acontecimientos de la interferencia en el manejo y producción entre los recursos hidrogeológicos y gasíferos que comparten los mismos reservorios arenosos de la Formación Zapallal. Para ello, se aportan datos petrofísicos a partir de los registros de perforación de los pozos Alejandrina, Papayal y Curumuy 1X y un modelo simulado de carga y manejo del gas responsable de la contaminación. De esta manera, se presenta un caso de interferencia de objetivos del subsuelo con la intención de preservar y restablecer el comportamiento de los pozos productores del acuífero y a la vez producir gas.

Palabras clave: Recursos hidrocarbúricos; Exploración; Control estructural; Terciario; Perú.

The gas potential of the Zapallal Formation in the Curumuy area (Sechura basin, Peru) and the interference of a hydrogeological well

Abstract

The drilling of the Alejandrina hydrogeological well at 209 m bbb, below the usual depth of water wells in the area, reached a sandy level of the Zapallal Formation with unexpected gas content that caused strong blow-up, venting, liquefaction of the ground, collapse of the drilling equipment and contamination of the traditionally producing levels of the confined aquifer. To mitigate this invasion of gas and its upwelling to the surface, the following wells were drilled: i) Papayal interference well, to carry out capture and cementing maneuvers with 5 horizontal attempts until intercepting the

Forma de citar: Roldán-Guevara, J.; Rossello, E.A. (2022). El potencial gasífero de la Formación Zapallal en el área Curumuy y la interferencia de un pozo hidrogeológico (cuenca Sechura, Perú). *Boletín de Geología*, 44(3), 119-142. <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n3-2022005>

Alejandrina well, and ii) Curumuy 1X exploratory well to reduce the pressure of the gas invasion and discover its possible abnormal origins at such shallow depths. The objective of the work is to present the stratigraphy of this potentially exploratory sector with proved gas resources of the Sechura basin and to describe the sequence of events of the interference in the management and relationships between the hydrogeological and gas resources that share the same sandstone reservoirs of the Zapallal Formation. For this, petrophysical data are provided from the drilling records of the Alejandrina, Papayal and Curumuy 1X wells and a simulated model of loading and handling of the gas responsible for the contamination. In this way, a case of interference of different subsoil objectives is presented with the intention of preserving and reestablishing the behavior of the producing wells of the aquifer and at the same time producing gas.

Keywords: Hydrocarbon potential; Exploration; Structural control; Tertiary; Peru.

Introducción

En el presente trabajo se describen las características del potencial gasífero comprobadas por las actividades exploratorias llevadas a cabo en el sector Curumuy y por la explotación de los recursos hidrogeológicos localizados en las secuencias de la Formación Zapallal. Sin embargo, las actividades en busca del preciado recurso hídrico para el desenvolvimiento agrícola de la región desértica de la cuenca Sechura produjeron inesperadas interferencias debidas a un súbito venteo (*blow-up* cf. Westergaard, 1987) que afectaron el normal desarrollo de los objetivos. Para poder evaluar el fenómeno y lograr mitigar el problema generado se ejecutaron diferentes sondeos que proporcionaron valiosa información petrofísica del subsuelo que contribuye con la proposición de soluciones que permitan el aprovechamiento de ambos recursos hidrogeológicos y gasíferos.

El área de estudio Curumuy se localiza dentro de un sector agrícola ubicado a 1,2 km al este de la vía Piura-Sullana y a 25 km al norte de la ciudad de Piura, en el extremo septentrional de la cuenca Sechura, perteneciente al departamento de Piura y dentro de las provincias de Sullana y Piura del noroeste del Perú (Figura 1).

La Provincia Petrolífera del Noroeste, conformada por las cuencas Talara, Sechura, Tumbes y Lancones, ha sido el foco de exploración y producción de hidrocarburos por más de 100 años (Higley, 2004). La cuenca Talara y Sechura son cuencas ampliamente estudiadas y conocidas como productoras de hidrocarburos (Ruegg y Naranjo, 1970). La actividad exploratoria en los alrededores del sector de Curumuy se remonta a 1920 donde la International Petroleum Company (IPC) perforó los pozos Tamarindo-1,

Tamarindo-2 y Tamarindo-3; los cuales registraron ocurrencias de petróleo (Iddings y Olsson, 1928). En 1954, la compañía Union Oil perforó los pozos Piura-1 y Piura-2, ubicados sobre un alto gravimétrico, los cuales no tuvieron éxito, aunque registraron ocurrencias de gas. Asimismo, IPC exploró el área circundante a la ciudad de Piura donde perforó en 1954 el pozo Espectativa-1X, detectándose ocurrencias de gas en el reservorio Verdún y se recuperó una muestra de gas seco (Stainforth, 1954), pero en aquellos años el gas no tenía el interés económico de la actualidad. En 1998, la compañía Pluspetrol se adjudicó un área que cubría la extensión total de la cuenca Lancones. En el 2001, Pluspetrol perforó el pozo Abejas 1X sin éxito y devolvió el lote en el año siguiente, aunque se registraron ocurrencias de petróleo y gas recuperándose una pequeña muestra de gas de un intervalo de edad Cretácica. En el mismo año, la empresa Olympic Perú se adjudicó el área estudiada (XIIC, como una extensión del Lote XIII) y en 2017 perfora el pozo exploratorio Curumuy 1X, que atravesó secuencias del Mioceno, Eoceno y alcanzó el Grupo Amotape (Olympic Perú, 2020). Se registraron ocurrencias de gas a lo largo de todo el pozo y la evaluación petrofísica sugiere la presencia de potenciales reservorios, aunque el pozo no fue probado hasta la fecha y en el 2019 Olympic adquirió 65 km de sísmica 2D.

Cronología de los acontecimientos

Toda la secuencia de acontecimientos relacionados con las actividades exploratorias que se describen en el presente trabajo se inicia cuando una empresa agrícola inicia la perforación en diciembre del 2016 del pozo de agua Alejandrina con un diámetro de 8,5" (en el fundo Agronor) con el objetivo de extraer agua subterránea de uso agrícola (Figura 2).

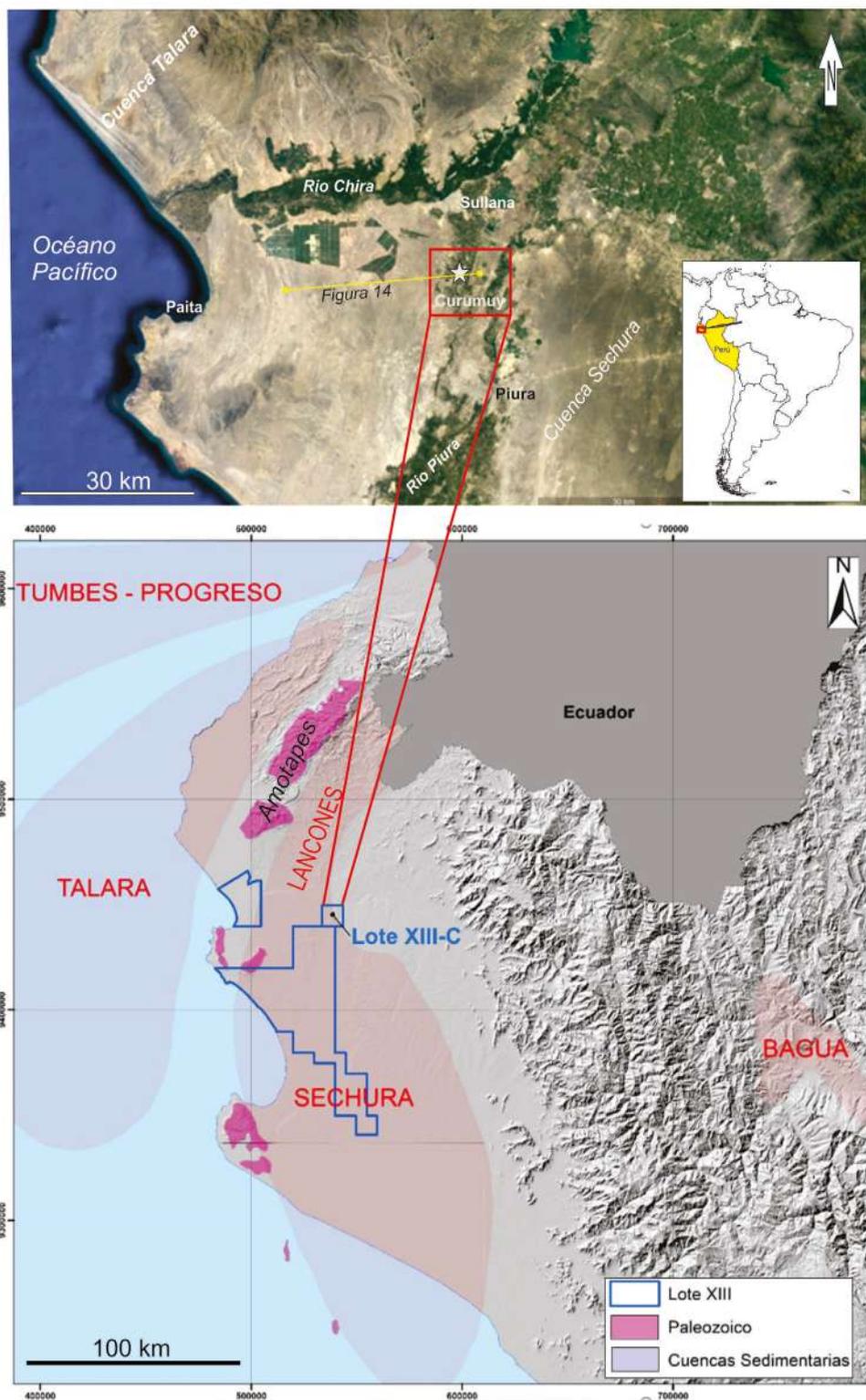


Figura 1. Localización del Lote IIIIC Curumuy sobre el extremo septentrional de la cuenca Sechura en el NO del Perú. El cuadrado indica la localización de la [Figura 8](#).

El potencial gasífero de la Formación Zapallal en el área Curumuy y la interferencia de un pozo hidrogeológico (cuenca Sechura, Perú)

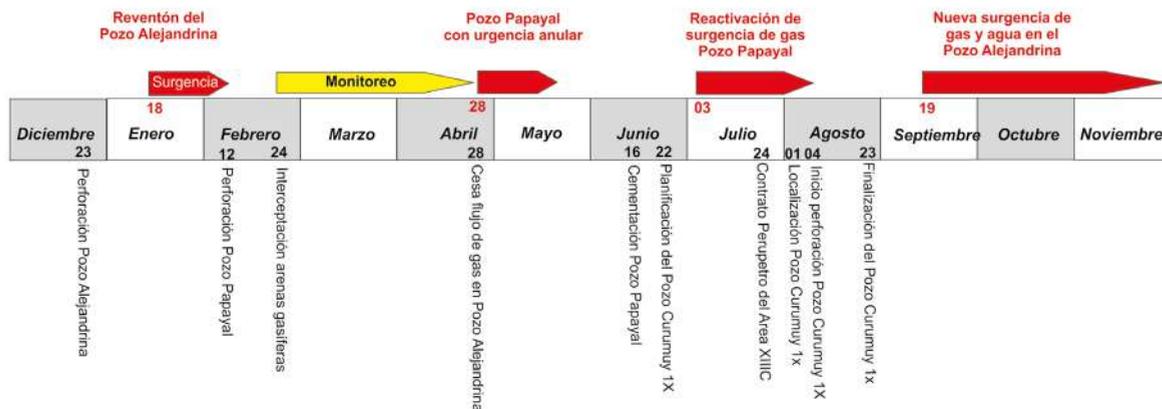


Figura 2. Línea de tiempo de los eventos desde diciembre del 2016 relacionados con los pozos que provocaron la surgencia de gas y su mitigación en el área de Curumuy durante los meses siguientes.

El 18 de enero del 2017, en plena tarea de perforación a los 219 m bpb (más allá de la máxima habitual que, en el sector y según información histórica, es de unos 160 m de promedio), la bomba del equipo de perforación se malogra deteniéndose la circulación en el sistema de lodo. Mientras se esperaba la reparación de dicho componente, inesperadamente ocurrió un reventón (*blow-out*), fenómeno que provocó un descontrol y surgencia a la superficie de agua y gas a presión. Esta situación generó el hundimiento del terreno donde se produjo un cráter que rápidamente se fue ampliando conforme pasaron

los meses de continua surgencia de agua y gas hacia la superficie (Figura 3).

La invasión descontrolada de gas del pozo Alejandrina se produjo cuando alcanzó un nivel estratigráfico arenoso de la Formación Zapallal con alta presión de gas. La surgencia súbita de gas y agua se encauzó a través del pozo sin revestimiento de diámetro de 8,5 pulgadas y erosionó los tramos más inconsolidados del terreno cercano a la superficie que desarrollaron un cráter invadido de agua de aproximadamente 40 m de diámetro.



Figura 3. Fotografías que documentan la situación generada por el pozo Alejandrina. **A.** Momento del reventón que provocó el colapso del equipo de perforación. **B.** Cráter generado por la subsidencia e inundación del sitio de emplazamiento.

Ocurrida la emergencia del pozo Alejandrina, los representantes de la empresa agrícola, en busca de apoyo técnico, acudieron ante la empresa Olympic (operadora de hidrocarburos con actividades en el sector aledaño) y realizan los reportes pertinentes a las autoridades locales con la finalidad de encontrar soluciones a la contingencia generada. Luego de gestiones por la gravedad del asunto, las autoridades brindan la autorización para realizar los trabajos necesarios de mitigar y controlar el pozo mediante acciones que permitan dar la mejor solución a la emergencia (Olympic Perú, 2020).

Luego del análisis de la situación técnica y evaluadas las alternativas disponibles, se programa la realización de un pozo dirigido horizontal para conexión y alivio en el nivel estratigráfico que presentó el gas a presión. El 12 de febrero del 2017, Olympic inició la perforación de alivio Papayal hasta los 282,3 m medidos en sección desviada, con maniobras inéditas para encontrar el pozo Alejandrina, ya que al no contar con registro de desviación dificultaba su ubicación en el subsuelo (Olympic Perú, 2020).

Sin embargo, como se describe más adelante y luego de un quinto intento, se logró interceptar al pozo Alejandrina en profundidad para poner un tapón de cemento que cese la surgencia por encima del nivel gasífero. Lamentablemente, debido al tiempo transcurrido y al irremediable daño que ya se había generado en el pozo Alejandrina estas maniobras fracasaron. Posteriormente y como medidas complementarias en superficie, se logró introducir material de acarreo que controló temporalmente la surgencia de gas y agua del pozo Alejandrina.

Basado en un nuevo análisis técnico y varios informes administrativos a las instituciones encargadas del Estado Peruano se resolvió, mediante una modificación del contrato de licencia de exploración hidrocarburífera del Lote XIIIIC operado por Olympic Perú (Figura 1), anexas el área del evento por ser colindante. Esto se fundamentó en el hecho que la empresa petrolera venía brindando apoyo técnico y logístico para minimizar los daños del pozo Alejandrina y el compromiso de asumir la inversión de los correspondientes trabajos de exploración de hidrocarburos. De esta manera, se buscó que en el área Curumuy se puedan realizar: i) las actividades que controlen y mitiguen el problema ambiental con el objetivo de salvaguardar la integridad física de la población involucrada en dicha zona y preservar el medio ambiente, y ii) se pueda dar viabilidad a las actividades que permitan un adecuado uso del recurso gasífero.

El 28 de abril del 2017, el pozo Alejandrina dejó de fluir a la superficie gas y agua a alta presión debido a un asentamiento del material introducido, tanto en la cementación de subsuelo al fondo del pozo como el material acarreado hacia el cráter en superficie. Aunque el pozo Papayal quedó con una pequeña surgencia de gas por el anular, no se encontró evidencia de la presencia de gas por la tubería del revestimiento (*drill pipe*).

El 16 de junio del 2017 el pozo Papayal fue cementado de acuerdo con la legislación peruana vigente. Luego de unos días, durante el monitoreo constante que se venía siguiendo, se evidenció presencia de humedad en el suelo alrededor del pozo Alejandrina, posteriormente el cráter comenzó a llenarse de agua y se reactivó la surgencia de gas en el área por el pozo Alejandrina (Figura 3B).

Finalmente, con el objetivo de controlar la reactivación de la surgencia de gas y sobre la base de toda la información obtenida hasta ese momento, Olympic decidió iniciar el 4 de agosto la perforación del pozo Curumuy 1X desde la misma plataforma que el pozo Papayal procediéndose a cementar el revestidor de 13 3/8 pulgadas en un tramo de 91,44 m. Después de 2 horas de fragüe del cemento, se observó un ligero burbujeo de gas saliendo por el espacio anular del pozo. Se remedió esta situación con 3 trabajos de cementación forzada por superficie usándose cemento de peso 1,56 g/cm³ con más 2 cilindros de silicato de sodio para generar un colchón reactivo para acelerar el proceso de fragüe. De esta manera, se consiguió controlar el evento quedando un mínimo flujo de gas remanente el cual se decidió desviar de la boca del pozo por línea de tubo macarroni de 1 1/4 pulgadas permitiéndose la normalización y continuación con las operaciones exploratorias (Olympic Perú, 2020).

Marco geológico

La cuenca Sechura se encuentra ubicada en el Noroeste del Perú extendiéndose sobre la costa del Departamento de Piura (Figura 1). Hacia el oeste, la cuenca Sechura está separada de la cuenca Talara por la Cordillera de la Costa (Macizo de Illescas – Alto de Paita – Montañas de la Brea y Amotapes), en tanto que su margen oriental está limitado por la Cordillera Occidental de los Andes (Higley, 2004). Sin embargo, la cuenca Sechura no siempre estuvo aislada de las cuencas cercanas. La actividad intermitente a lo largo de las fallas normales que dominaron los altos estructurales de basamento pudo haber controlado interacciones entre las cuencas

Sechura, Talara, Lancones y Trujillo (Dunbar *et al.*, 1990). Este comportamiento se refleja en su límite norte, donde nuevos datos del pozo Curumuy 1X modificarían la extensión de la cuenca.

Estratigrafía

La constitución estratigráfica del sector estudiado Curumuy de la cuenca Sechura está representada a partir de la información obtenida de los pozos Papayal y Curumuy 1X por unidades del Terciario directamente apoyadas sobre el basamento metamórfico paleozoico del Grupo Amotape (Figura 4). La asignación formacional de estas unidades se basó en la integración de las litofacies y los análisis bioestratigráficos a partir de correlaciones con la información de los numerosos trabajos disponibles de la cuenca Sechura (Olsson, 1932; McDonald, 1956; Gonzales, 1976; Caldas *et al.*, 1980; INGEOMINAS, 1979; Palacios, 1994; Jaillard *et al.*, 1998).

A) Paleozoico

Grupo Amotape. Si bien no tienen expresión superficial en la cuenca Sechura, los diferentes tipos litológicos reunidos en el Grupo Amotape

constituyen el basamento de la cuenca (Martínez, 1970). Está compuesto mayoritariamente por cuarcitas blanquecinas, pizarras y pelitas con algunos intervalos de esquistos gris oscuro a negro. Según se puede observar en el registro de imágenes de pared de pozo, el contacto superior entre la secuencia paleozoica con el cenozoico es una discordancia angular. Posee un alto grado de fracturamiento natural lo cual constituye la porosidad secundaria de este reservorio. Conformado por rocas metamórficas como cuarcitas, pelitas y filitas que presentan alto grado de fracturamiento, lo cual favorece su porosidad secundaria como potencial reservorio naturalmente fracturado.

B) Cretácico

Formación Gigantal (Aptiano-Albiano). Es una secuencia conglomerádica que aflora en el flanco oriental del macizo de La Brea, yace en discordancia sobre el Paleozoico y marca el inicio de la sedimentación mesozoica de la parte marginal occidental de la cuenca Lancones que fue cortada por una serie de fallas transversales. Se le asigna una edad cretácica inferior pre-Albiano.

ERA	SISTEMA	SERIE	UNIDAD LITOESTRATIGRÁFICA	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	AMBIENTE	
CENOZOICO	NEÓGENO	Mioceno	Zapayal		Areniscas y limolitas con capas delgadas de arcillitas	Deltaico	
			Montera		Areniscas y limolitas con capas delgadas de arcillitas		
	PALEÓGENO	Eoceno Superior	Heat		Arcillitas con capas de areniscas y capas delgadas de calizas	Playas, barras y canales de marea Llanuras litorales en sucesión de ciclos transgresivos	
			Chira		Lutitas y arcillitas gris rojizas intercaladas con limolitas y capas de areniscas		
			Verdun		Areniscas y conglomerados con capas de lutitas		
MESOZOICO	CRETÁCEO	Sup.	Redondo		Lutitas grises intercaladas con arenisca y algo de calizas	Marino somero a poco profundo	
			Tablones		Conglomerado y areniscas	Abanico aluvial a fluvial	
			Lancones		Aglomerado volcánico, brechas y areniscas volcánicas	Plataforma Plataforma somera Abanico aluvial a fluvial	
		Inf.	Muerto		Limolitas y areniscas intercaladas con calizas, calizas y lutitas negras intercaladas, olor fétido		
			Pananga		Conglomerados		
		Gigantal		Conglomerados			
				Conglomerados			
PALEOZOICO	CARBONIFERO	Sup.	Chaleco de Paño		Pizarras, esquistos y cuarcitas	Secuencia turbidítica con leve a moderado metamorfismo	
		Inf.	Cerro Prieto		Arenisca cuarcifera gris claro intercalado con conglomerados y argilitas		
	DEVÓNICO	Superior	Palaus		Argilitas y cuarcitas		
			Medio	Cerro Negro			Pizarras grises intercaladas con cuarcitas y monzogranitos
					Inf.		

Figura 4. Cuadro estratigráfico de todas las unidades que integran la cuenca Sechura (tomado de Perupetro, 2003).

Formación Muerto (Cenomaniano-Turoniano). Esta unidad está conformada por calizas negras con olor fétido y lutitas negras con alto contenido de materia orgánica. Estas rocas representan la potencial roca madre de la cuenca Sechura. Es reconocida en la quebrada homónima y se extiende por los sectores bajos de La Brea y Los Amotapes. Está constituida por calizas grano fino color gris claro con restos de flora, seguida por areniscas calcáreas, limolitas y lutitas amarillo rojizo por la oxidación; siguen calizas grises oscuro con gasterópodos y margas. Hacia la parte superior, son calizas arcillosas masivas con ostreas y conchas. El espesor varía de 30 a 200 m y contiene microfauna de foraminíferos como *sumbelina*. El Grupo Copa Sombrero pasa concordantemente sobre estos niveles calcáreos.

Grupo Copa Sombrero (Turoniano-Santoniano). Este grupo constituye una secuencia de aprox. 3,000 m donde se han diferenciado las siguientes formaciones: i) Formación Huasimal. Con litología predominante está conformada por lodolitas negras friables y lodolitas calcáreas oscuras, areniscas gris violáceo grano fino, limolitas compactas y lodolitas calcáreas con nódulos de areniscas, con estratos cortadas por diques sedimentarios la base por una secuencia de arcillas y limolitas calcáreas de color gris oscuro, areniscas feldespáticas, brechas piroclásticas y tobas; por relación estratigráfica, la edad de esta unidad la ubican en el Cenomaniano. ii) Formación Jahuay Negro. Con un espesor estimado de 700 m conformada por una secuencia de areniscas feldespáticas grano fino a medio, grauvacas grises, contienen concreciones esféricas calcáreas; en algunos sectores se intercalan con brechas volcánicas andesíticas y tobas; sobre la base de la presencia de *Inoceramus* se le asigna una edad del Cenomaniano-Turoniano. iii) Formación Encuentros. Con un espesor del orden de los 500 m conformados por una secuencia de areniscas limosas color gris oscuro a claro, en estratos delgados con nódulos de calizas y niveles de areniscas bituminosas; variando hacia arriba a areniscas glauconíticas en estratos masivos. La parte superior está conformada por una secuencia rítmica de limonitas y lodolitas negras con estratificación delgada, areniscas feldespáticas color gris amarillento y niveles micro conglomerádicos.

C) Cenozoico

Formación Verdún (Eoceno Superior): [Iddings y Olsson \(1928\)](#) describen con este nombre la secuencia de areniscas macizas y lutitas yesíferas en los alrededores de Verdún, en la región de Talara. Presenta en su base conglomerados rojizo de tinte

púrpura bastante consolidado en algunas localidades con clastos de cuarcita gris y otros provenientes de la erosión de macizos rocosos metamórficos de edad paleozoica erosionados de las unidades del complejo metamórfico, con matriz de microbrechas de la misma composición que los fenoclastos y cementados con material carbonatado. Son seguidos por conglomerados polimícticos con matriz arenosa y areniscas cuarzosas a líticas de grano fino a grueso. Hacia arriba siguen calcoarenitas, dolomíticas orbitoidales que varían desde amarillo a tonos castaños, en bancos moderados a macizos compuestos esencialmente de fragmentos bioclásticos recristalizados a calcita o dolomita que engloban litoclastos angulosos pequeños de rocas metamórficas y cuarzo, y frecuentemente, grandes bloques de xenoclastos angulosos de los mismos tipos de rocas, incluye también grandes caparzones de lamelibranquios fosilizados mayormente consistentes en ostreas. Hacia el tope presenta intercalaciones de lutitas de colores grises, rojos, marrones, amarillos y predominantemente verdes; micro micáceas y micro carbonosas. Se le asigna edad Eoceno superior basado en la abundancia de fauna guía encontrada, particularmente *Lepidocyrtia peruviana*.

Formación Chira (Eoceno): la denominación de esta unidad proviene del valle del Chira, donde [Iddings y Olsson \(1928\)](#) definen el grupo Chira-Verdún compuesto predominantemente por lutitas de color gris, gris oscuro a gris olivo, micro micáceas y micro carbonosas intercaladas con areniscas de grano fino a medio, limolitas de color gris micro micáceo carbonosas y calizas. La sección inferior se compone de areniscas en capas delgadas blanca-beiges moderadamente coherentes, sumamente fosilíferas, interpuestas por areniscas limonitizadas. Siguen hacia arriba areniscas tobáceas gris-beiges con gran contenido de foraminíferos bien conservados, gradan verticalmente hacia arriba a intercalaciones con areniscas dolomíticas blancas de grano fino de aspecto sacaroideo sumamente duras. En la porción superior, predominan areniscas beiges de grano fino con abundante contenido de foraminíferos, muy resbaladizas cuando están humedecidas. La porción intermedia es una secuencia algo monótona, consistente en lutitas bentoníticas gris-beiges, sumamente frágiles y livianas. La parte superior de la sección se está compuesta por lutitas cineríticas gris-marrones con venillas de yeso areniscas tobáceas muy finas gris-blanquecinas y delgadas capas bentoníticas diatomáceas gris-marrones, muy plásticas cuando se humedecen, con escasas intercalaciones de capas de areniscas arcósicas que lateralmente pasan a alineaciones de nódulos achatados. Sobre la base de

su fauna, [Ruegg y Naranjo \(1970\)](#) asignan su edad al Eoceno terminal.

Formación Mancara (Oligoceno medio): esta unidad litoestratigráfica no se encuentran expuesta en el desierto de Sechura, habiendo sido reconocido solamente en los pozos exploratorios. Su contacto basal es una discordancia sobre la formación Chira o unidades más antiguas. La litología está constituida por areniscas con guijarros redondeados de cuarzo, cuarcita y lutitas de agua salobre; frecuentemente presentándose conglomerados ([Ruegg y Naranjo, 1970](#); [Vargas, 1970](#)). El grosor promedio ha sido estimado en 229 m. La edad de la formación Mancara queda asignada al Oligoceno medio en base a formas tales como *Rotalia aff. beccarii* y el grupo *Lepidocyclinas*.

Formación Heath (Oligoceno superior): esta unidad esta litológicamente constituida principalmente por lutitas marrones o gris-marrones, limolitas y arcillas abigarradas con aproximadamente 300 m de potencia denominada por J. Grzybowski (en [INGEOMINAS, 1979](#)). El contacto con la Formación Mancara exhibe una gradación progresiva. Hacia la base presenta un paquete de carbonatos de color blanco amarillento seguido de intercalaciones de areniscas, lutitas, limolitas y calizas. Hacia el tope predominan lutitas de color gris seguidas de areniscas de grano fino a grueso intercaladas con lutitas, limolitas y calizas. Las limolitas son de color gris oscuro, micro micáceas, micro carbonosas y ligeramente calcáreas, asimismo las calizas son de color crema, micro micáceas y micro carbonosas. Sobre la base de su contenido faunístico, mayormente foraminífera (*Globorotalia barissanensis*, *Globigeroides conglobatus*, *Globigerina venezuelana*, entre otros) se considera a esta unidad perteneciente al Oligoceno superior en base a su fauna mayormente foraminífera.

Formación Montera (Mioceno Inferior): esta unidad está compuesta hacia la base predominantemente por lutitas grises y gris parduzcas, micro micáceas y micro carbonosas, con abundante presencia de fragmentos de conchas como accesorios. Hacia el tope presenta areniscas grises de grano fino a grueso intercaladas con limolitas, lutitas y capas delgadas de calizas. Las limolitas son de color gris y las lutitas presentan varios colores (verde, amarillo, rojo y gris). La denominación corresponde a Werenfels (en [Ruegg y Naranjo, 1970](#)), quien estableció una sección de 25 m, en la quebrada Montera, contigua al flanco oriental del macizo de Illescas. En Sechura, el afloramiento consiste en areniscas calcáreas blanca-amarillentas

duras y de grano medio, seguidos hacia arriba por coquinas porosas duras compuestas en un 100% de materiales conchíferos pequeños y homogéneos. En los pozos perforados en la llanura desértica, la litología de la formación consiste en intercalaciones de lutitas gris-claras o verde-azulinas con conglomerados y areniscas duras en paquetes moderados a delgados. Al estar comprendida la Formación Montera entre las formaciones del Oligoceno medio a superior y la Formación Zapallal (Mioceno medio a superior) y por los estudios paleontológicos ([Olsson, 1932](#)) esta unidad se asigna al Mioceno inferior.

Formación Zapallal (Mioceno Medio – Superior): esta unidad, también conocida como Formación Zapallar o Zapayal, fue introducida por [Zúñiga-Rivero \(1970\)](#) como la secuencia de mayor grosor y extensión regional dentro de la columna estratigráfica terciaria de la cuenca Sechura debida a una intensa sedimentación asociada a una invasión marina amplia somera; y su contacto con la Formación Montera es deposicional. Hacia la base, presenta predominantemente areniscas de grano fino cuarzosas con fragmentos líticos intercaladas con capas delgadas de limolitas, lutitas de color gris y calizas subordinadas de color crema, micro micáceas y micro carbonosas con abundantes fragmentos de conchas como accesorios. Se reconocen los siguientes Miembros: i) Miembro Inferior constituido por areniscas calcáreas duras blanco-grisáceas que pasan a tonalidades amarillentas en capas moderadas, compuesto principalmente por granos redondeados de carbonatos blancos y cementados por las mismas soluciones. Continúa con areniscas calcáreas con abundante contenido de foraminíferos bien conservados, entre ellos el género *Cancris cf. catmertsis* ([Zúñiga-Rivero, 1970](#)). La parte superior consiste, en orden descendente: a) Tobas Grises esencialmente de paquetes de tobas diatomáceas, b) Zona Mineralizada Diana y c) Diatomita Tobácea. ii) Miembro superior: se reconocen cinco paquetes litológicos en orden ascendente: a) Arenisca Huecos de Almejas (*Clam Bore Sandstone*), arcósicas duras de grano fino a medio con moldes de gasterópodos y en menor cantidad dientes de peces en colitos fosfáticos, b) Zona Mineralizada Cero, c) Diatomita Inca, d) Zona Mineralizada Minerva y e) Diatomita Quechua, identificados por el geólogo Cheney en las áreas de fosfatos. En la parte superior, pasa a porciones conglomerádicas oxidadas con clastos heterogéneos. La edad de la Formación Zapallar queda comprendida entre el Mioceno inferior a medio de acuerdo con la flora fósil estudiada principalmente en la clase Diatomácea, los géneros *Coscinodiscus oculusirides*,

nedulifer, *argus*, *marginatus*, etc., también asociados a faunas características (Ruegg y Naranjo, 1970).

Conformación tectónica

Las cuencas de antearco del litoral noroeste peruano se desarrollan sobre el margen occidental de la cordillera de los Andes y pueden ser divididas en depocentros separados por altos basamentales (Figura 5). El origen de estas cuencas está asociado con la interacción entre las placas Nazca-Farallón y Sudamericana, la cual generó una serie de eventos deformativos que evolucionaron inicialmente esencialmente extensionales expresado por fallamiento normal y la subsidencia en la región del Antearco, predominantemente sobre su margen occidental (Jaillard *et al.*, 2000; Diniz *et al.*, 2010; Espurt *et al.*, 2018; Lemgruber-Traby *et al.*, 2020). Sin embargo, últimamente trabajos de campo en las cuencas del NO del Perú muestran una mayoría de fallas del tipo transcurrentes sustentadas por datos cinemáticos ya indicados por Murany (1975). Racz (1999) define a estos depocentros, particularmente a la vecina cuenca Talara, de tipo *pull-apart*; Seranne (1987), en cambio, Grosso *et al.* (2005), reconocen varios estilos estructurales a lo largo del tiempo que involucran escenarios extensionales, compresivos y transcurrentes, los que son tenidos mayoritariamente en cuenta por los trabajos más recientes (Llerena *et al.*, 2018; Lemgruber-Traby *et al.*, 2020).

El levantamiento del Orógeno Andino durante las diferentes fases tectónicas cenozoicas controló la subsidencia flexural sobre el eje de las cuencas y el margen oriental (Shepherd y Moberly, 1981). De este modo, las cuencas Lancones y Sechura sobreyacen a corteza de tipo continental compuesta por el Terreno Amotape-Tahuin y el Terreno Paracas, que poseen afloramientos de rocas metamórficas paleozoicas expuestas en el Macizo de Illescas y en el Complejo de Olmos, respectivamente. Sobre este basamento sobreyacen rocas sedimentarias con registro desde el Paleozoico hasta el reciente.

La cuenca Sechura es un depocentro de antearco cenozoica generado por la flexura y subducción de una placa oceánica. Contiene sedimentos del Cretáceo y Terciario Superior que alcanzan aproximadamente 4500 m de espesor (Figura 6). Se trata de una cuenca que conforma un gran hemigraben cuyo control mayor de subsidencia lo conforma la falla que lo limita con las montañas de Bayobar, donde tiene los más grandes espesores, siendo la zona de menor subsidencia y menos espesor de los sedimentos la zona NE (región de Sullana), la sedimentación en esta cuenca se inicia en el Eoceno con la Formación Mancora Verdún y termina en el Plioceno con la Formación Hornillos, teniendo como sello al desarrollo del tablazo (Dunbar *et al.*, 1990).

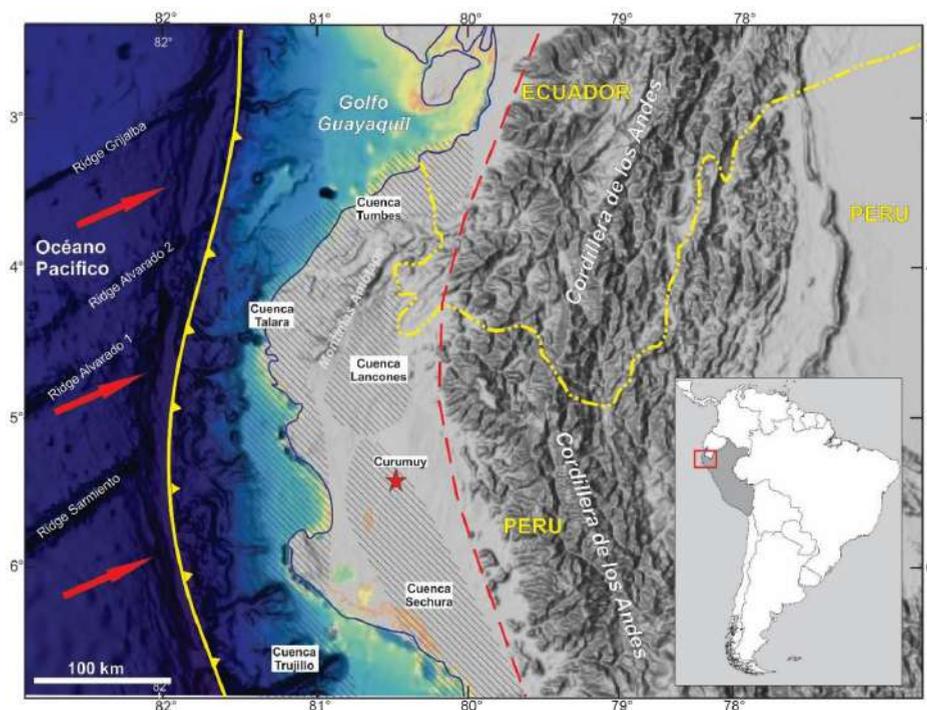


Figura 5. Esquema de la localización tectónica del sector estudiado Curumuy (estrella roja) sobre el margen acrecional pacífico del NO del Perú.

En la cuenca Sechura, se reconoce al igual que en sus cuencas vecinas una tectónica andina con las siguientes fases (Diniz *et al.*, 2010; Espurt *et al.*, 2018; Lemgruber-Traby *et al.*, 2020): a) de compresión del Eoceno terminal-Oligoceno inferior, b) de distensión mayor del Mioceno medio y c) de compresión Mio-plioceno. La reactivación de los fallamientos en el basamento terciario durante la historia deposicional de la cuenca Sechura se tradujo en el desarrollo de pilares y fosas debajo de la secuencia sedimentaria, produciendo de ese modo un plegamiento progresivo en la cuenca.

La cuenca Sechura inició su desarrollo en el Eoceno superior como efecto de fallamientos tafrogénicos en la orla continental, de tal forma que el mar terciario hizo su ingreso en forma paulatina a medida que dichos dislocamientos se fueron acentuando alcanzando la transgresión su máxima extensión durante el Mioceno. La deposición de la Formación Verdún, se produjo dentro de un mar subsidente evidenciada en las terrazas de esta edad desarrolladas sobre la Cordillera de la Costa con materiales carbonatados y en un mar de condiciones agitadas. Al acentuarse el hundimiento se estableció una acumulación tranquila en sus etapas iniciales y fallamientos sin-sedimentario posteriores de la Formación Chira, vinculada a un volcanismo piroclástico en las regiones de tierra firme. La ausencia de clásticos provenientes del macizo de Illescas y la presencia de sedimentos con esta edad sobre éste sugiere una sumersión general incluyendo la Cordillera de la Costa. A fines del Eoceno, la sedimentación marina fue interrumpida por un levantamiento y el área sujeta a

emersión y erosión durante el Oligoceno inferior. Sobre la superficie erosionada se reanudaron las condiciones de deposición marina, acumulándose primero la Formación Mancara y luego la Formación Heath durante el Oligoceno medio a superior respectivamente.

A principios del Mioceno se intensificaron los fallamientos gravitacionales en la porción pedemontana occidental Andina, donde la cuenca Sechura alcanzó su máximo desarrollo. La sedimentación miocena se inició con una deposición clástica de ambiente de agitación marina y luego influenciada por una actividad piroclástica, emplazándose la Formación Montera, del Mioceno inferior. En el Mioceno medio, la actividad volcánica en tierra firme se acentuó y bajo esta influencia se depositó la Formación Zapallal en un mar oscilante, desarrollando discordancias erosionales locales. Luego de un levantamiento, se establecieron condiciones litorales, principalmente continentales y durante el Mioceno superior hasta principios del plioceno se depositó la Formación Miramar. La ocurrencia de discordancias intraformacionales miocenas es el resultado de plegamientos progresivos, principalmente desarrollados durante el Mioceno medio y el Mio-plioceno. La presencia de dos niveles de areniscas conglomerádicas (*Clam Bore Sandstones*), en discordancia en la mitad superior y en el tope de la Formación Zapallal, que marcan los límites superiores del miembro inferior y superior de la unidad, al igual que este tipo de paquetes dentro de la Formación Miramar, son evidencias conclusivas de este mecanismo de deformación sin-sedimentaria.

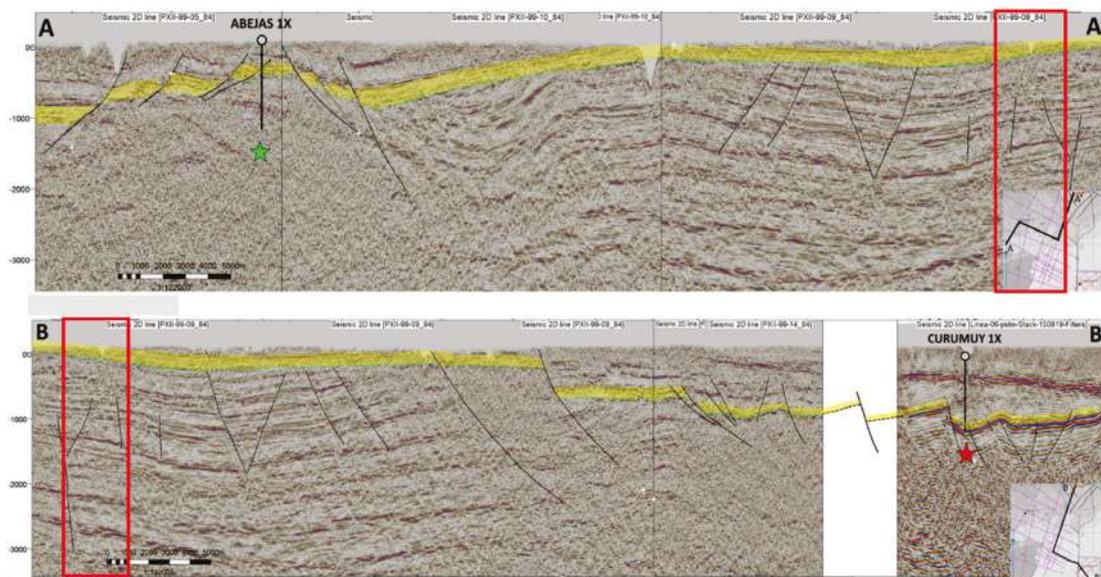


Figura 6. Líneas sísmicas compuestas que muestran que el lote XIIIIC forma parte del mismo contexto geológico que la cuenca Lancones. Las formaciones perforadas por los pozos Abejas 1X (2002) y Curumuy 1X soportan dicha interpretación.

A principios del Plioceno la región sufrió un levantamiento y fue objeto de erosión. Encima del relieve desarrollado se restablecieron condiciones de acumulación litoral, depositándose la Formación Hornillos con una sedimentación estrechamente vinculada a materiales terrígenos provenientes de los afloramientos paleozoicos de las Montañas Amotape (Figura 5). Probablemente a fines del Plioceno, la pila sedimentaria acumulada fue moderadamente comprimida contra estos macizos paleozoicos por convergencias sublatitudinales. El levantamiento del Plioceno, considerable en la región cordillerana, se manifestó en menor magnitud en la orla continental.

Como consecuencia del levantamiento de los Andes en el Pleistoceno, se desarrollaron las plataformas carbonáticas marinas del noroeste (Tablazos), donde cada una de estas formas representa una considerable y súbita pulsación de ascensos y erosiones. Después de estos acontecimientos, la región ya mostraba una fisonomía bastante similar a la actual y se sucedieron una serie de acontecimientos denudatorios, tales como la formación de las depresiones, llanuras de inundación y abanicos aluviales. Finalmente, como consecuencia de una costa en emersión se desarrollaron los barjanes, dunas y cordones litorales, adquiriendo la región el rasgo morfológico actual.

El acuífero Zapallal

El acuífero Zapallal se encuentra ubicado en el norte del Perú, se extiende por más de 10,000 km² entre los 5° y 6,5° Sur y los 80° y 81° Oeste, coincidente con casi la totalidad de la parte media y baja del valle del río Piura (Figura 7). El acuífero Zapallal es la principal fuente de

alimentación de agua subterránea en la zona investigada, considerado como uno de los acuíferos más importantes a nivel nacional. El acuífero Zapallal abastece de agua subterránea a todo el valle del Medio y Bajo Piura, para uso agrario, poblacional, minero, etc. Desde su descubrimiento hasta la actualidad, la explotación del acuífero ha aumentado considerablemente, poniéndose en riesgo la explotación en algunas zonas (ANA, 2014).

El acuífero superficialmente tiene forma de un rectángulo irregular y se encuentra delimitado por afloramientos rocosos representado por los cerros, Illescas, Chalaco, Tablazo, Vice y Chusis. Entre los sectores Sechura y Parachique el acuífero tiene un ancho promedio de 45 km que se va incrementando progresivamente hasta alcanzar una longitud de 75 km, entre los sectores de Catacaos – Loma Vegón, y finalmente hacia el Océano Pacífico se ensancha hasta 120 km (Figura 7). En el área Ramón-Zapallal, este nivel alcanza 30 m de espesor y constituye el único acuífero importante dentro de la Formación Zapallal. En el resto de las áreas de explotación el acuífero tiene pocos metros y probablemente la humedad del fondo de la depresión se deba a la circulación de agua subterránea siguiendo este nivel estratigráfico (ANA, 2014).

Con la finalidad de ejemplificar las características y profundidades habituales de explotación del recurso hídrico, Galecio-Ríos (2018) realiza un estudio hidrogeológico de detalle de un sector próximo a la localidad de Piura donde describe la morfología y tipos de los distintos acuíferos que determinan niveles arenosos de la Formación Zapallal (Figura 6).

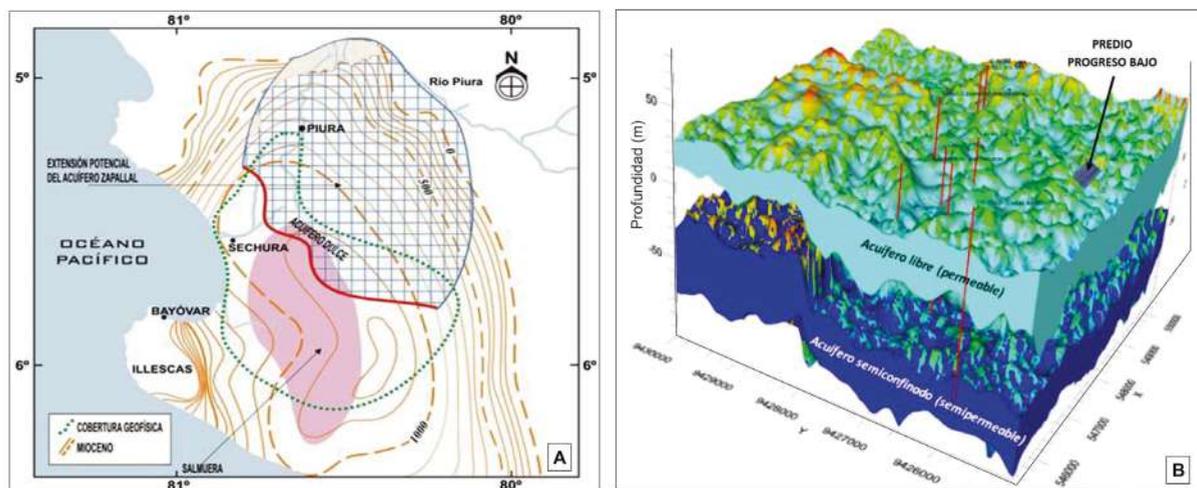


Figura 7. A. Esquema de la dimensión del Acuífero Zapallal. B. Bloque diagrama de la distribución de los acuíferos de la Formación Zapallal en un sector al este de Piura (tomados de Galecio-Ríos, 2018).

El área de Curumuy se encuentra en una zona dedicada a la agricultura y agrícola industrial razón por la cual, requiere de un volumen importante de agua, muchos de los cuales, son proporcionados por pozos informales sin registros geológicos. Según los registros oficiales de la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2014), en los últimos años en la zona se ha incrementado notablemente la explotación de agua subterránea y la perforación de pozos (Tabla 1). Este recurso hídrico es utilizado para el consumo en diferentes actividades domésticas, agrícolas e industriales (Tabla 2).

Las hidroisohipsas de un área al este de Piura permiten obtener la dirección del flujo subterráneo, habiéndose

obtenido en este caso una dirección principal del agua subterránea de Noreste a Suroeste donde las cotas de los niveles freáticos varían desde 5,15 hasta 29,45 m s.n.m. para los pozos inventariados (Galecio-Ríos, 2018). Las fuentes de alimentación o de recarga del acuífero en la zona de estudio son el aporte a masas de agua por precipitación, el flujo subterráneo proveniente de la infiltración del río Piura y aledaños. Aporte de agua de infiltración a partir de algunas superficies agrícolas. Las zonas de descarga son principalmente las quebradas y la extracción por los pozos productores de agua subterránea.

Tabla 1. Volúmenes de producción en m³ del acuífero de agua dulce Zapallal, basados en el inventario de pozos perforados y estudios hidrológicos realizados en la cuenca del río Piura (tomados de ANA, 2014).

Volumen explotado	1980	2004	2011	2014
	DGAS	IRH-INRENA	ANA	ANA
m ³ /año	27.009.954	43.332.011	36.567.093	58.120.379
hm ³ /año	27,01	43,33	36,57	58,12
litros/seg	856	1,37	1,16	1,84

Tabla 2. Volúmenes según los usos en m³ del acuífero de agua dulce Zapallal basados en el inventario de estudios hidrológicos realizados en la cuenca del río Piura (tomados de ANA, 2014).

Uso	Total (m ³)
Agrícola	2.745.403
Doméstico	44.131.131
Doméstico-Pecuario	4.260.465
Doméstico-Pecuario-Industrial	315.360
Industrial	2.042.470
Pecuario	1.435.310
Pecuario-Industrial	13.140
No especificado	3.177.100
Total	58.120.379

Metodología

Con la finalidad de estudiar las características del subsuelo afectado por el problema suscitado por el pozo Alejandrina y las actividades para mitigarlo se realizó una síntesis de las características geológicas e hidrogeológicas vinculadas con el sector Curumuy. Además, se llevaron a cabo actividades típicamente relacionadas con la investigación del subsuelo a partir de la información provista por los pozos Papayal y Curumuy 1X y la interpretación de secciones sísmicas 2D en tiempo en plataformas georreferenciadas. Los intervalos perforados por estos pozos fueron perfilados a hoyo abierto por la empresa Schlumberger que incluía los perfiles del triple combo, sónico y finalmente de presión de formaciones (XPT). Seguidamente, se perforó con dos brocas PDC la sección de 25,8 m,

alcanzándose el 23 de agosto a las 21:15 hs la profundidad final de 1419,75 m atravesando más de 137 m dentro de rocas paleozoicas del Grupo Amotape.

Durante la perforación, se registró la litología desde la superficie hasta la profundidad final con muestras de canaleta (*cuttings*) recolectadas con intervalos de separación cada 3 m. En paralelo, se registró la cromatografía de gases usándose un cromatógrafo con lecturas desde C1 hasta C5, con lecturas de CO₂ y H₂S.

Se analizaron las características petrofísicas de seis pozos exploratorios con objetivos hidrocarburíferos de los alrededores del área de Curumuy con la finalidad de correlacionar los resultados con los obtenidos del pozo Curumuy 1X (Figura 8).

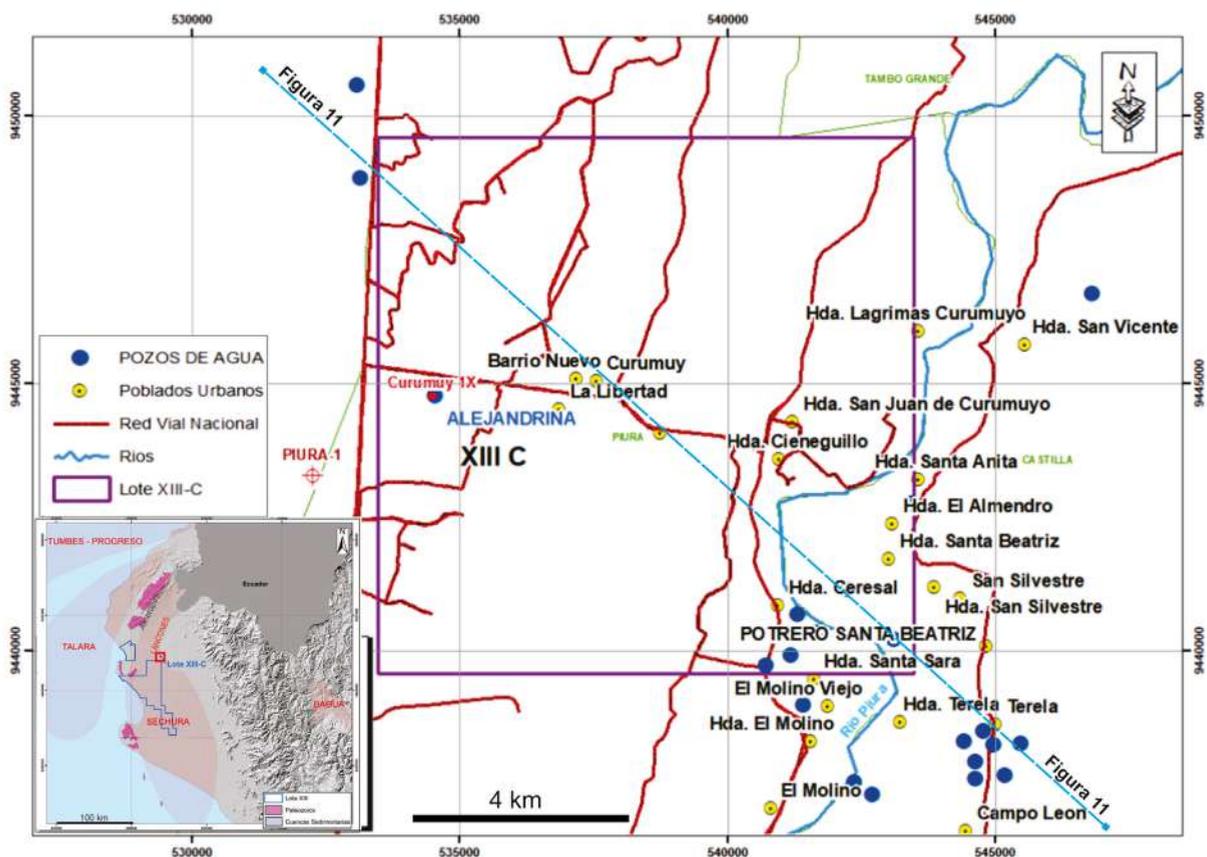


Figura 8. Mapa de ubicación de pozos hidrogeológicos y el pozo Curumuy 1X en el área estudiada (véase localización en la Figura 1).

Los registros de pozo tomados por [Schlumberger \(2017\)](#) fueron adquiridos a partir de los siguientes en las dos siguientes carreras:

Primera carrera de 449,5 m, donde hasta los 93 m en profundidad medida (MD) se adquirió Potencial Espontáneo (SP); Rayos Gamma (GR); Curvas de Inducción (Resistividades AIT); Cáliper (PPC de cuatro brazos); Registro Sónico (MSIP); Densidad (TLD); Neutrón (CNL). Además, se tomaron 15 puntos de presión de formación con la herramienta XPT, de los cuales 9 fueron calificados de buena calidad y confiables.

Segunda carrera de 1419,7 m, donde hasta el zapato del revestidor de 9 ½ pies, localizado a 358 m en profundidad medida (MD), se adquirieron los mismos registros de la carrera anterior y se adicionaron sondas Imagen resistiva de pared de pozo (FMI).

Se realizaron cálculos para delimitar verticalmente los posibles reservorios de gas y estimar su capacidad de almacenamiento $\phi \times H$ (Porosidad \times espesor útil), los posibles contactos de fluidos y el valor del índice de hidrocarburos $\phi \times H \times (1-S_w)$ (Porosidad \times espesor útil Hidrocarbúfero \times 1 menos la Saturación de agua), de las formaciones a diferentes niveles en el pozo Curumuy IX.

Por otro lado, se recopiló información geológica regional ([INGEOMINAS, 1979](#)) e hidrogeológica disponible en reportes de los acuíferos que se emplazan en la Formación Zapallal.

Resultados

Reconocimiento estratigráfico

El pozo Curumuy IX alcanzó una profundidad final de 1419,7 m ([Tabla 3](#)) donde penetró el basamento del Grupo Amotape. De este modo, el pozo atravesó todas las formaciones cenozoicas reconocidas en la cuenca Sechura ([Tabla 3](#)).

La columna sedimentaria atravesada por el pozo Curumuy IX, y en parte por el pozo Alejandrina, evidencia varios nuevos reservorios potenciales que abrirían un nuevo

frente exploratorio en este límite de las cuencas Sechura y Lancones ([Figura 9](#)).

Grupo Amotape. Apareció conformado esencialmente por areniscas y cuarcitas de grano fino a medio con algunos niveles interestratificados de esquistos lutíticos.

Formación Verdún. Esta unidad se mostró constituida predominantemente por areniscas cuarzosas de grano fino a grueso, areniscas conglomerádicas y conglomerados intercalados con esporádicos niveles de lutitas de color gris, rojo, marrón, amarillo y predominantemente verde. Esta Formación es el principal objetivo gasífero del sector Curumuy ya que es el equivalente temporal del reservorio que produce gas en los campos vecinos al oeste de Mochica y La Casita ([Perupetro, 2022](#)).

Formación Chira. Consiste predominantemente por lutitas de color gris, gris oscuro a gris olivo, intercaladas con areniscas, limolitas y calizas. Esta formación presenta abundantes microfósiles (foraminíferos) bien preservados y corresponde al sello regional para el Verdún y para el Cretácico.

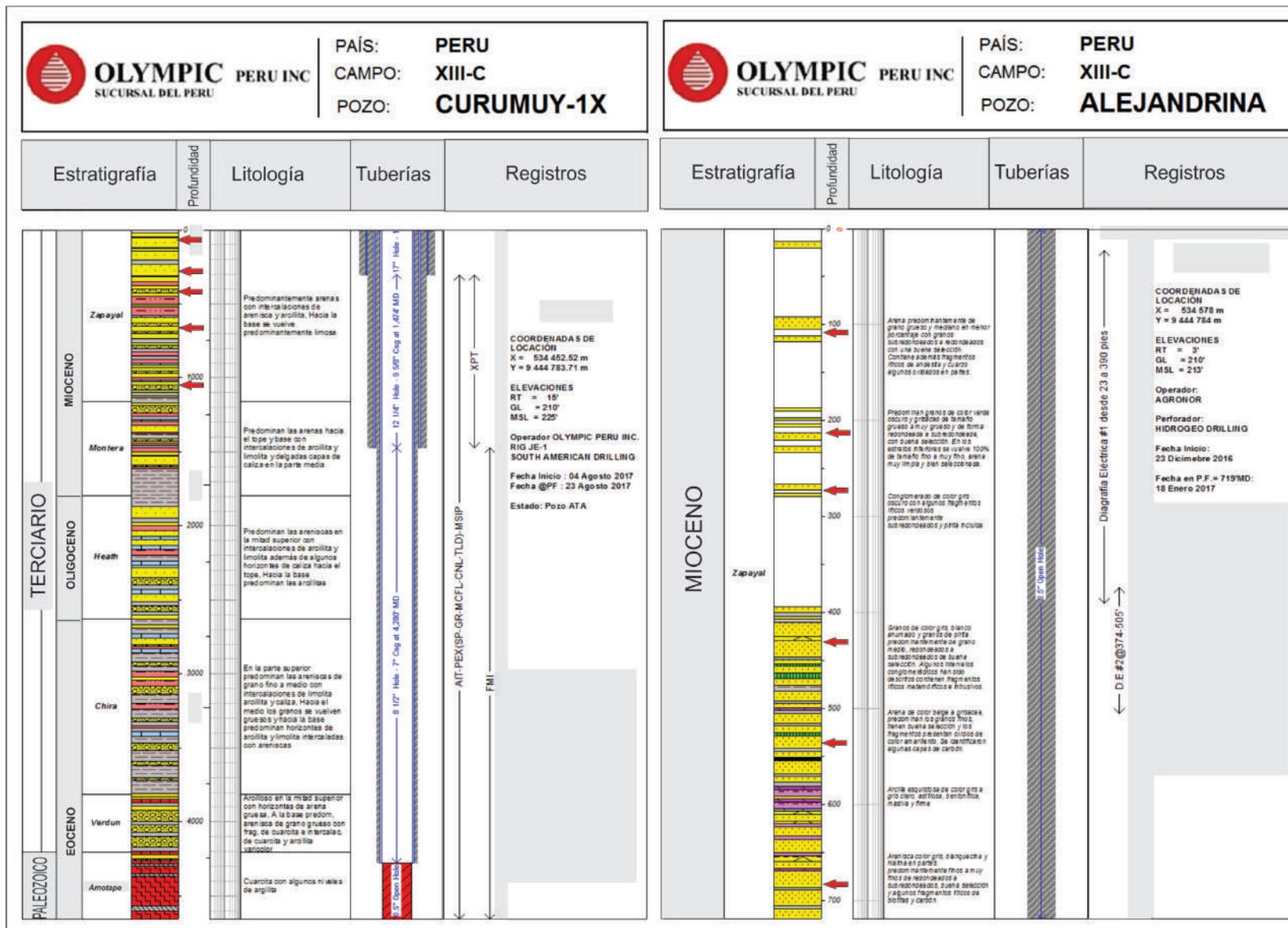
Formación Heath. Conformada por pelitas castaño oscuras con alternancia de secuencias de dolomitas asignadas al Oligoceno-Mioceno Inferior.

Formación Montera. Representada por areniscas grises de grano fino a grueso intercaladas con limolitas, lutitas y hacia el tope presenta capas delgadas de calizas. Hacia la base predomina la presencia de lutitas grises y grises amarronadas; además cuenta con abundante presencia de fragmentos de conchas como accesorios. Corresponde a la sección más somera y posee niveles de potenciales reservorios.

Formación Zapallal. Corresponde a la sección más somera caracterizada por niveles de potenciales reservorios constituidos por areniscas cuarzosas con fragmentos líticos de grano fino a grueso, intercalada con limolitas y lutitas grises. Hacia base presenta areniscas de grano fino intercaladas con capas delgadas de limolitas, lutitas y calizas. Presenta abundantes fragmentos de concha como accesorios.

Tabla 3. Los topes formacionales atravesados y corregidos a la vertical del pozo Curumuy IX.

Formación	Profundidad (m)	Nivel del mar (m)	Espesor (m)
Zapallal/reciente	0	63,7	352,9
Montera	352,9	-288,9	194,1
Heath	547,1	-483,1	254,5
Chira	801,6	-737,6	361,5
Verdún	1163,1	-1099,1	118,5
Paleozoico	1281,6	-1217,6	138
Profundidad final	1419,7	-1355,7	



Juli Roldán-Guevara; Eduardo A. Rossello

Figura 9. Registro de información de los pozos Curumuy 1X (izquierda) y Alejandrina (derecha) compilados por Olympic (véanse localizaciones en Figura 8). Las flechas rojas indican niveles areniscosos con buenas propiedades de reservorio.

Caracterización estratigráfica de los acuíferos de la Formación Zapallal

Se realizó una compilación y análisis estratigráfico de los pozos de agua en el distrito de Piura (ANA, 2014) que se incrementaron desde 25 pozos en el año 1980 hasta un total de 48 pozos en el año 2014 con una profundidad máxima promedio de 160 m. La medición de los niveles en los pozos se ha ejecutado con una sonda eléctrica, y se ha efectuado cuando los pozos se encuentran en estado de equilibrio (apagados); y uniendo cotas y profundidades de igual valor, obteniéndose las curvas de isoprofundidad e hidroisohipsas respectivamente.

El análisis litoestratigráfico de los pozos de aguas pudo identificar los siguientes 3 niveles hidrogeológicos con diferentes características petrofísicas que determinan el potencial acuífero de dos de ellas dentro de la Formación Zapallal (Figura 10).

Nivel hidrogeológico I: considerado un acuífero libre superior, con calidad de agua salobre por lo que no es de interés para su explotación el nivel estático o nivel freático a una profundidad de 10 m a 30 m desde la superficie constituida por arenas con algunas intercalaciones de lutitas. El análisis de estos planos con los registros de la napa freática permitió inferir la profundidad de los niveles estáticos en la zona de estudio varía desde los 28,55 m hasta 45,70 m para los pozos inventariados.

Nivel hidrogeológico II: constituido por lutitas y limo arcillitas con algunas intercalaciones de arenas y gravas, esta zona se considera como sello de 30 a 50 m de espesor.

Nivel hidrogeológico III: considerado un acuífero confinado inferior que se encuentra a una profundidad aproximada de 80 a 95 m desde la superficie y actualmente por su calidad de agua dulce adquiere importancia (Tabla 2).

Actividades de remediación

La perforación del pozo Alejandrina tenía como objetivo alcanzar un acuífero confinado, sin embargo, los sucesos generados produjeron un súbito cambio en la calidad de agua por la invasión de hidrocarburos provenientes de las formaciones infrayacentes y también significativos problemas de estabilidad del suelo e impactos ambientales en los alrededores de su ubicación. Con la finalidad de efectuar la remediación del descontrol de gas y agua del pozo Alejandrina se realizaron las siguientes operaciones mediante la perforación de los pozos Papayal y Curumuy.

Inicialmente, con el objetivo de controlar la surgencia del pozo Alejandrina se perforó el pozo de alivio Papayal direccional para interceptarlo y captar el flujo descontrolado de gas y agua (Figura 11).

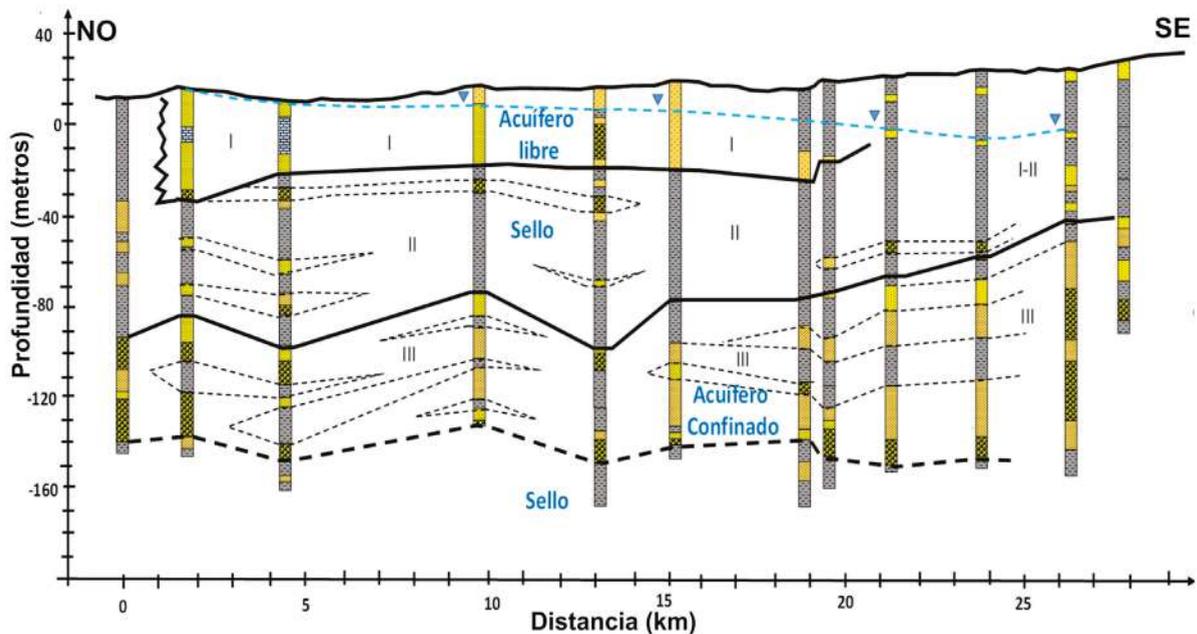


Figura 10. Sección estratigráfica de los pozos hidrogeológicos de la Formación Zapallal a partir de datos de ANA (2014) (véase localización en la Figura 8).

Se empezó a perforar el pozo verticalmente en modo rotario con broca tricónica de 8,5 pulgadas, hasta la profundidad de 30,5 m. Se guió la dirección del pozo hacia el Este en dirección de la ubicación del pozo Alejandrina en superficie, una vez alcanzado el nivel de arenas muy bien seleccionadas se empezó a navegar horizontalmente con ayuda del motor de fondo. Para ello se utilizó el sistema anticollisión para detectar la tubería de perforación que se encontraba atrapada en el pozo Alejandrina. Se realizaron sucesivas maniobras de cementación y apertura de nuevos huecos (Figura 12). Finalmente, luego de 5 intentos de conexión que consistieron en la perforación de tramos dirigidos horizontales (*side track*) a partir del mismo emplazamiento del pozo Papayal se logró establecer contacto con el pozo Alejandrina al identificarse la captación de un significativo nivel de flujo.

Finalmente, se logró la comunicación hidráulica en la parte superior del reservorio del pozo Alejandrina con presencia de flujo de gas comprobado con el aditamento de trazadores colores rojizos en el lodo de perforación que llegó a salir a superficie a través del cráter del pozo Alejandrina. De esta manera, se consiguió comprobar la interceptación del pozo Alejandrina, y se mantuvo el cuidado para evitar surgencia a través del pozo de alivio Papayal a través del control del peso del lodo y la circulación constante.

Con la conexión establecida entre ambos pozos se envió un tapón de cemento a profundidad en el pozo Alejandrina a través del pozo Papayal, estas maniobras

pese al esfuerzo de campo no llegaron a tener un éxito inmediato en la surgencia. Por lo cual, se procedió a introducir material de acarreo en superficie, logrando un control temporario de la surgencia de gas y agua del pozo Alejandrina.

Posteriormente, debido a la reactivación de la surgencia de gas y agua en el cráter del pozo Alejandrina luego de todas las medidas adoptadas y evidenciándose en superficie en diferentes sectores un burbujeo constante de gas, se tomó la decisión de iniciar el 4 de agosto de 2017 la perforación del pozo exploratorio vertical Curumuy 1X con el objetivo de conocer la estratigrafía en detalle del sector y adquirir la mayor cantidad posible de información para la toma de decisiones ante cualquier eventual reactivación de la surgencia así como realizar un modelo geológico que pueda explicar los fenómenos aquí suscitados. Así se inició la perforación de la sección de 17 ½ pulgadas con una broca tricónica desde superficie hasta la profundidad de 93 m. El pozo fue revestido y cementado con tubería de 13 ¾ pulgadas hasta la profundidad de 91,5 m dentro de la Formación Zapallal para aislar el acuífero identificado y se puede continuar con las siguientes maniobras de perforación. A continuación, fue perforada la sección de 12 ¼ pulgadas de diámetro hasta la profundidad de 449,6 m colocándose el revestidor de 9 ¾ pulgadas empleándose dos brocas compactas de diamante policristalino (PDC) y una tricónica. Se cementó todo este tramo como maniobras estándares en las operaciones de perforación hidrocarburíferas, las cuales no se adoptan en pozos de agua.

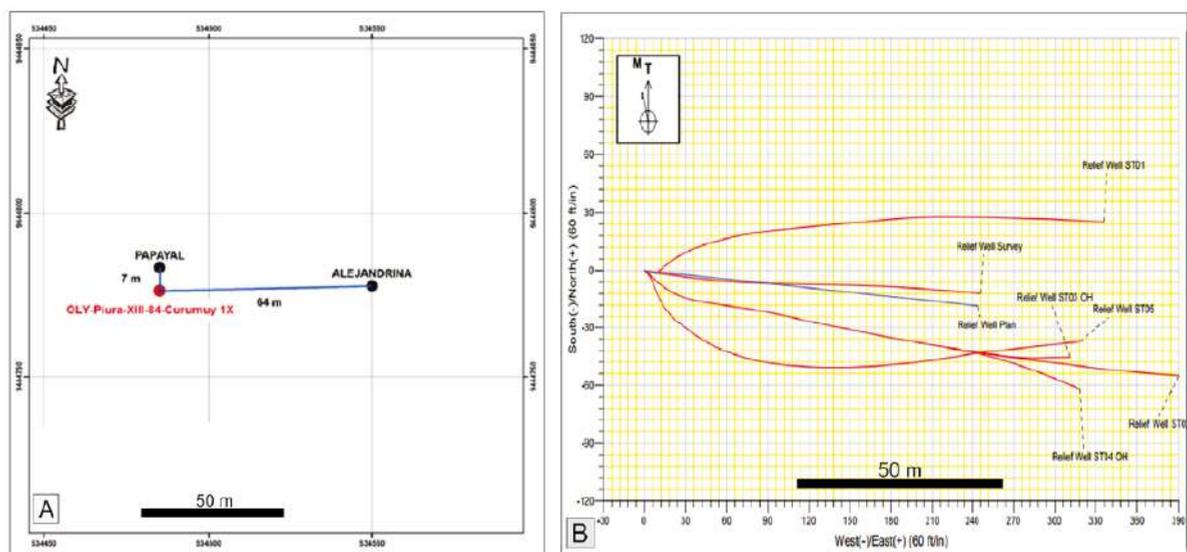


Figura 12. A. Mapa de ubicación de los pozos Alejandrina, Papayal y Curumuy 1X. B. Diagrama de los recorridos de los *side tracks* subhorizontales del pozo Papayal con la finalidad de interceptar al pozo Alejandrina (véanse localizaciones en Figura 8).

Potencialidad hidrocarburífera de las formaciones Zapallal y Montera

Con la perforación del pozo Curumuy IX, se obtuvo valiosa información geológica mediante el control geológico de perforación, los registros eléctricos y las pruebas a hueco abierto realizadas. Durante la perforación no se presentaron manifestaciones de petróleo y tampoco importantes manifestaciones de gas

salvo algunas trazas en las lecturas de gas. De acuerdo con las descripciones litológicas, micropaleontológicas y de registros eléctricos se realizó una correlación con los pozos Espectativa y San Alberto para establecer la columna estratigráfica reconocida por el pozo exploratorio Curumuy IX. De este modo, se pudieron definir al menos 2 sistemas petroleros hipotéticos: Muerto – Amotape y Muerto – Verdún (Figura 13).

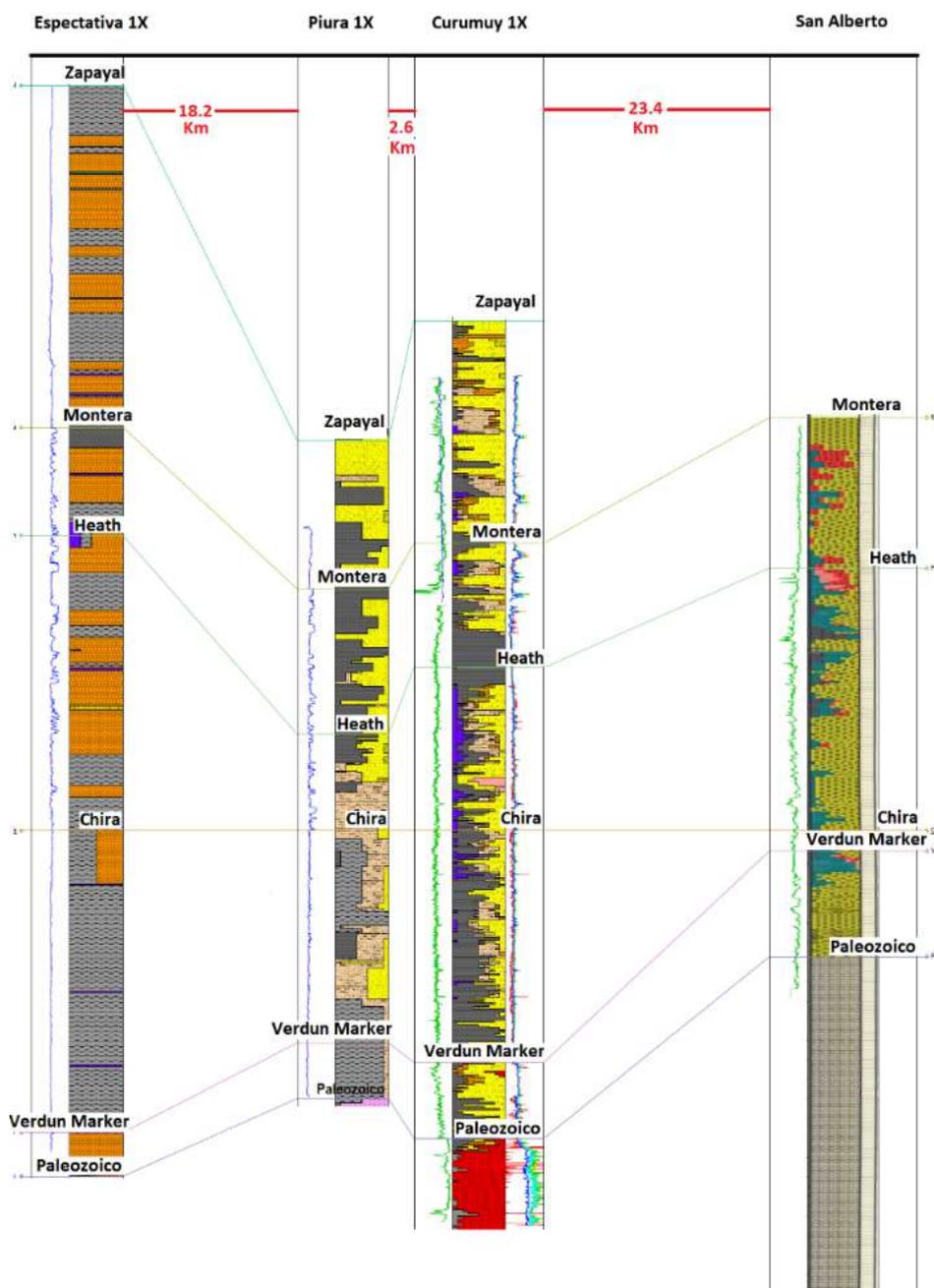


Figura 13. Correlación de los registros estratigráficos del pozo Curumuy XI con los pozos cercanos (véase localización aproximada en la Figura 1).

A partir de la interpretación de los resultados de los pozos realizados se han podido identificar varios niveles con alta saturación de gas, claramente separados por sellos pelíticos, los cuales debido a la perforación sin revestimientos del pozo Alejandrina se vieron seriamente afectados. Los niveles de acuíferos superiores, que son la principal fuente de abastecimiento de agua en la zona, presentan daños irreversibles por la invasión de un flujo cruzado de gas proveniente de las secuencias infrayacentes.

Un modelo simulado de la carga de gas hacia los niveles superficiales muestra los eventos progresivos producidos por la sucesión de los pozos Alejandrina, Papayal y Curumuy 1X (Figura 15).

La sección esquemática estratigráfica reconocida en el sector Curumuy muestra las litologías de los niveles con potencial de reservorio; como areniscas, y no reservorios integrados por sucesiones pelíticas (Figura 15A). Los registros de los pozos han servido de información para esta interpretación y los datos de estructurales de afloramientos cercanos y del registro de imágenes, indican una inclinación suave con promedio de 6° hacia el Azimut de 315°.

La Formación Zapallal presenta la distribución inicial en los reservorios identificados como niveles de acuíferos hacia la superficie y hasta 9 niveles de arenas como reservorios de gas hacia la base y el tope de la Formación Montero, identificados por cromatografía de gases y registros de Densidad-Neutrón (Figura 15B).

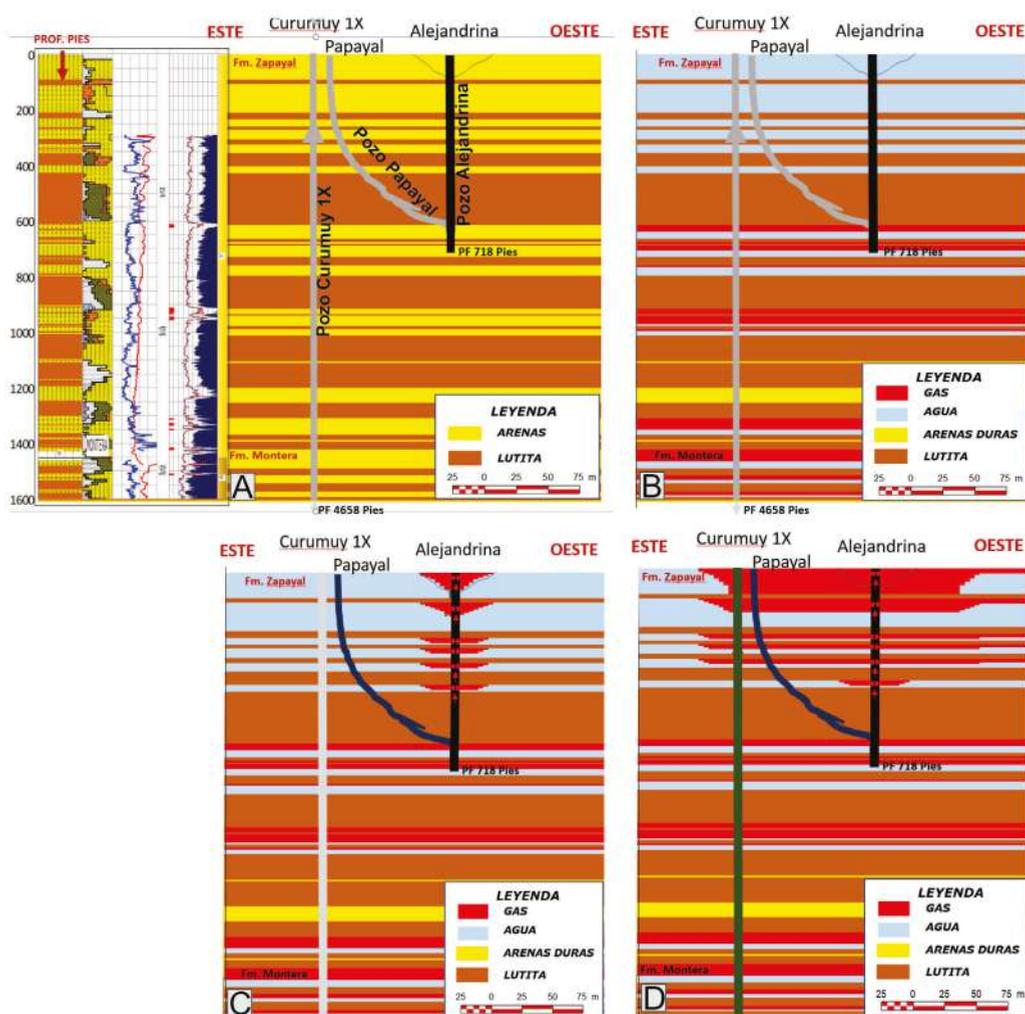


Figura 15. Esquemas evolutivos de las consecuencias en los acuíferos afectados por el pozo Alejandrina y los efectos de los pozos de remediación realizados. **A.** Sección esquemática estratigráfica. **B.** Sección esquemática de niveles cargados de fluidos. **C.** Sección con migración incipiente de gas por el pozo Alejandrina. **D.** Sección con migración avanzada de la invasión de gas por los pozos Alejandrina, Papayal y Curumuy 1X.

Luego de la perforación del pozo Alejandrina se originó el descontrol cuando el gas y agua ascienden hacia la superficie produciéndose el inicio del flujo de gas invadiendo los niveles acuíferos superiores determinantes del daño irreversible (Figura 15C). Con el objetivo de interceptar al pozo Alejandrina se perfora el pozo Papayal que luego de 5 intentos direccionales logra conectar hidráulicamente ambos pozos, aunque no controla la surgencia de gas hacia superficie.

Finalmente, la perforación del pozo Curumuy 1X a unos 100 m desde su inicio evidencia la invasión de gas en los niveles acuíferos y cuando se concluyó la cementación presentó un flujo de gas por el espacio anular entre la cañería y la pared del pozo (Figura 15D). Se logró controlar el flujo y se continuó con la perforación. Estas maniobras determinaron el cese del flujo a superficie a través del pozo Alejandrina, aunque poco tiempo después se reactivó fluyendo hasta la fecha.

Conclusiones

En el área Curumuy se tienen registrados hasta el año 2014 un total de 48 pozos perforados por agua, los cuales tienen una profundidad máxima promedio de 160 m debajo de la superficie del terreno, y el acuífero de interés se encuentra a una profundidad promedio de 80 hasta 190 m.

La perforación del pozo de agua Alejandrina se realizó a una mayor profundidad que la que venían alcanzando los pozos hidrogeológicos del área Curumuy que afectó niveles areniscosos saturados con gas. Como consecuencia, se produjo un reventón con la pérdida de un equipo de perforación y ocasionó un daño irreversible en los acuíferos de la zona, además de poner en riesgo la seguridad de los trabajadores y población de la zona.

Mediante la perforación y adquisición de información del pozo de alivio Papayal y, particularmente del pozo Curumuy 1X, se ha logrado identificar los reservorios que aportan gas a superficie y se ha determinado que los mismos producen la invasión a los acuíferos más someros de la Formación Zapallal mediante el pozo Alejandrina, el cual no cuenta con revestimiento de ningún tipo superficial en la zona. Estos niveles que vienen siendo invadidos de gas necesitan ser descomprimidos de manera permanente debido al alto riesgo existente en que el gas siga avanzando a zonas de baja presión y continúe contaminando al acuífero libre, así como alcance a afectar también a los niveles confinados existentes en el área.

El daño generado por el pozo Alejandrina en la zona de influencia del reservorio de agua es según el modelo de fluidos planteado irreversible, pues el gas buscará migrar por la zona de mayor debilidad. Por lo tanto, aunque el evento en superficie cese en el pozo Alejandrina, el gas se movilizará por el reservorio hasta encontrar una nueva vía de migración y escape que lo lleve a superficie. Esta situación de los acuíferos abre la posibilidad de significativos daños colaterales que pueden afectar a la población y a sus diferentes actividades económicas, como son la agricultura y la ganadería en la zona.

Con la finalidad de mitigar el efecto producido por el pozo Alejandrina se considera que la mejor manera de mantener controlado la invasión de gas a los acuíferos es aliviar la presión de formación mediante la completación del pozo Curumuy 1X, desde el Grupo Amotape hasta la Formación Zapallal y puesta en producción temprana de manera permanente. Una vez que las autoridades competentes vinculadas con el manejo de los recursos autoricen la ejecución de esta actividad ya que se la considera como la más adecuada e inmediata alternativa desde el punto de vista medioambiental para controlar esta emergencia y evitar poner en riesgo la integridad de las personas que laboran y habitan en los alrededores del área Curumuy.

Finalmente, se considera que el presente trabajo muestra un caso poco descrito en la bibliografía de la interferencia entre valiosos recursos hidrogeológicos e hidrocarbúferos localizados en una misma secuencia y las actividades que se desarrollaron para su mitigación.

Agradecimientos

Se deja constancia de agradecimiento a la Empresa Olympic Perú, operadora de la exploración hidrocarbúfera del Lote XIIC en el sector Curumuy, por facilitar el acceso a la información de subsuelo que fundamenta este trabajo y a los colegas con los que se compartieron fructíferas discusiones. Los revisores, el Dr. Héctor de Santa Ana y otro anónimo, han contribuido con correcciones y sugerencias muy atinadas que permitieron mejorar la claridad del trabajo.

Referencias

ANA (2014). Estudio hidrológico de la cuenca del Río Piura. Reporte interno.

- Caldas, J.; Palacios, O.; Pecho, V.; Vela, C. (1980). Geología de los cuadrángulos de Bayóvar, Sechura, La Redonda. Pta. La Negra, Lobos de Tierra, Las Salinas y Mórrope. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Boletín No. 32, Serie A, 1-45. <https://doi.org/10.1306/3D9327D7-16B1-11D7-8645000102C1865D>
- Diniz, S.H.; De Sá, F.R.; Rodríguez, C.; Santos, C.G.; Cruz, J.M.N.; Beas, W.E. (2010). Talara Basin, Peru: Structural and Stratigraphic Characterization Based on 3D-Seismic Data. *SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*, Lima, Perú. <https://doi.org/10.2118/139283-MS>
- Dunbar, R.B.; Marty, R.C.; Baker, P.A. (1990). Cenozoic marine sedimentation in the Sechura and Pisco basins, Peru. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 77(3-4), 235-261. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(90\)90179-B](https://doi.org/10.1016/0031-0182(90)90179-B)
- Espurt, N.; Brusset, S.; Baby, P.; Henry, P.; Vega, M.; Calderon, Y.; Ramírez, L.; Saillard, M. (2018). Deciphering the Late Cretaceous-Cenozoic structural evolution of the North Peruvian forearc system. *Tectonics*, 37(1), 251-282. <https://doi.org/10.1002/2017TC004536>
- Galecio-Ríos, T.E.D. (2018). Exploración hidrogeológica para la ejecución de una obra de captación de agua subterránea en el predio Progreso Bajo, Distrito de Castilla, Provincia y Departamento de Piura – Perú. Tesis de grado. Universidad Nacional de Piura.
- Gonzales, G. (1976). Ciclos de Sedimentación en el Eoceno de la Cuenca Talara. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 51, 73-80.
- Grosso, S.; Marchal, D.; Daudt, J. (2005). Integración afloramiento-subsuelo: relación entre la complejidad estructural y el comportamiento productivo de los reservorios del Lote X, cuenca Talara, Perú. *V Seminario Internacional de Exploración y Producción de Petróleo y Gas – INGEPET*, Lima, Perú.
- Higley, D. (2004). *The Talara basin province of northwestern Peru, Cretaceous-Tertiary total petroleum system*. U.S. Geological Survey.
- Iddings, A.; Olsson, A.A. (1928). Geology of Northwest Peru. *AAPG Bulletin*, 12(1), 1-39.
- INGEOMINAS (1979). Estudio Geológico de Bayovar. Geología de la Región de Bayovar. Escala 1:50.000. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. II, 132 pp.
- Jaillard, E.; Laubacher, G.; Bengtson, P.; Dhondt, A.; Philip, J.; Bulot, L.; Robert, E. (1998). Revisión estratigráfica del Cretáceo Superior del noroeste peruano y suroeste ecuatoriano. Datos preliminares, consecuencias tectónicas. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 88, 101-115.
- Jaillard, E.; Hérail, G.; Monfret, T.; Díaz-Martínez, E.; Baby, P.; Lavenu, A.; Dumont, J.F. (2000). Tectonic evolution of the Andes of Ecuador, Perú, Bolivia and northernmost Chile. In: U.G. Cordani, E.J. Milani, A. Thomaz Filho, D.A. Campos (eds.). *Tectonic Evolution of South America*. (pp. 481-559). Rio de Janeiro.
- Lemgruber-Traby, A.; Espurt, N.; Souque, C.; Henry, P.; Calderon, Y.; Baby, P.; Brusset, S. (2020). Thermal structure and source rock maturity of the North Peruvian forearc system: Insights from a subduction-sedimentation integrated petroleum system modeling. *Marine and Petroleum Geology*, 122, 104664. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104664>
- Llerena, C.E.; Romero, D.; Benique, A.; Lee K. (2018). Análisis estructural de la Cuenca Talara – Resultados preliminares. *IX Seminario Internacional de Exploración y Producción de Petróleo y Gas – INGEPET*. Lima.
- Martínez, M. (1970). Geología del Basamento Paleozoico en las Montañas Amotape y Posible origen del Petróleo en rocas Paleozoicas del Noroeste del Perú. *Ier Congreso Latinoamericano de Geología*, Lima, Perú.
- McDonald, D.H. (1956). Miocene of the Sechura Desert Piura. *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, 30, 23-45.
- Murany, E. (1975). Tectonic framework of Northwest Peru. Exploration Report 75-09. Belco Perú. NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. <http://www.noaa.gov/>

- Palacios, M. (1994). Geología de los cuadrángulos de Paita, Piura, Talara, Sullana, Lobitos, Quebrada Seca, Zorritos, Tumbes y Zarumilla. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Carta Geológica Nacional, Boletín número 54, Serie A.
- Perupetro (2003). Peruvian petroleum, a renewed exploration Opportunity. Perupetro S.A., Lima.
- Perupetro (2022). www.perupetro.com.pe/wps/portal/corporativo/PerupetroSite/estadisticas/
- Olsson, A.A. (1932). Contribution to the tertiary paleontology of Northern Peru. *Bulletin of American Paleontology*, 19(68), 1-33.
- Olympic Perú (2020). Reporte del incidente en el sector Curumuy (Sechura, Perú). Reporte interno, Piura, 25 pp.
- Raez, M. (1999). Tectónica en la Cuenca Talara costafuera, Nor-Oeste Perú. *II Seminario Internacional de Exploración y Producción de Petróleo y Gas – INGEPET*, Lima, Perú.
- Ruegg, W.; Naranjo, M. (1970). Evaluación geológica y posibilidades de hidrocarburos del desierto de Sechura y Adyacente Zócalo Continental. Dirección General de Hidrocarburos (Lima). Reporte interno.
- Schlumberger (2017). Registros del pozo Curumuy 1X. Olympic. Reporte interno.
- Seranne, M. (1987). Evolution tectono-sedimentaire du Bassin de Talara (nord-ouest du Perou). *Bulletin de l'Institut Français des Études Andines*, 16(3-4), 103-125.
- Shepherd, G.L.; Moberly, R. (1981). Coastal structure of the continental margin, northwest Peru and southwest Ecuador. *Geological Society of America Memoir*, 154, 351-391.
- Stainforth, R.M. (1954). A Revised Summary of the Stratigraphy and Paleontology of North western Peru International Petroleum Company (Talara). Internal report 121, 21A.
- Vargas, J. (1970). Evaluación geológica del área de Sechura. Petróleos del Perú - Operaciones en el Noroeste. Reporte 300-23.
- Westergaard, R. (1987). *All about blowout*. Norwegian Oil Review.
- Zúñiga-Rivero, J.F. (1970). Geología de la Península de Illescas. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de San Agustín, Perú.

Fecha de recibido: 25 de abril de 2022

Fecha de aprobado: 29 de julio de 2022
