

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL FACULTAD REGIONAL CONCORDIA

TRABAJO PARA OBTENER EL TÍTULO DE ESPECIALISTA EN INGENIERÍA AMBIENTAL



CARACTERIZACION PETROFISICA DE LA
FORMACION BOTUCATU Y MIEMBRO SOLARI
COMO POSIBLES RESERVORIOS DE HIDROGENO
GASEOSO



AUTOR
ING. VIVIANA ANDREA VENTURINO

DIRECTOR
DR. A. A. SILVA BUSSO

AÑO 2019

Resumen

En este trabajo se propone el análisis sobre la viabilidad del almacenamiento de hidrógeno gaseoso, para su uso como combustible en la generación de energía eléctrica, en el subsuelo nororiental de la provincia de Entre Ríos. Así mismo, éste es parte conformante de la estructura correspondiente al trabajo de tesis de maestría en Ingeniería Ambiental y cuyo Plan se expone como Anexo en el presente.

Este estudio surge de la premisa de buscar nuevas alternativas acordes a los mecanismos de acción para la reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), considerados en el programa Horizonte 2020 y 2050 de la Unión Europea.

Los estudios internacionales disponibles en la bibliografía muestran que la geología juega un importante papel como continente y almacén del gas hidrógeno (H₂) en profundidad. Como antecedentes, en esta región de la provincia se han realizado diversos estudios de correlación de la geología regional, estructural y tectónica. Los cuales, han incluido el análisis de la litología y estratigrafía a través de perfilajes de pozos obtenidos de las perforaciones para explotación hidrotermal de la zona.

Finalmente se estudiaron las variables petrofísicas primarias como porosidad y permeabilidad, de la Formación Botucatú y Miembro Solari con datos obtenidos de muestras sin fracturas de afloramientos. Se concluye que ambas unidades formacionales serían poseedoras de buenas cualidades como reservorio, lo que amerita futuras investigaciones, requiriéndose datos obtenidos de muestras en profundidad para disminuir la incertidumbre sobre los resultados.

Palabras Claves: Formación Botucatú, Miembro Solari, permeabilidad, porosidad, hidrógeno gaseoso

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	3
2. OBJETIVOS	3
3. METODOLOGÍA	3
4. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO	3
5. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	6
5.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE PETROFÍSICA	6
5.1.1. POROSIDAD (Φ).....	6
5.1.2. PERMEABILIDAD (K).....	7
5.2. CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURAL Y TECTÓNICA DE LAS TRAMPAS	9
5.3. GEOLOGÍA REGIONAL.....	10
5.4. ANTECEDENTES EXPLORATORIOS DE HIDROCARBUROS.	10
5.5. UNIDADES FORMACIONALES CON CARACTERÍSTICAS DE RESERVORIOS, POSIBLES “PLAY PETROLEROS”	11
5.5.1. PLAY NEOPALEOZOICOS	12
5.5.2. PLAY PALEOZOICOS PRE-CARBÓNICOS	12
5.5.3. PLAY CUERPOS SUBEFUSIVOS NEOJURÁSICOS –EOCRETÁDICOS	12
5.6. PLAYS RELATIVOS AL ALMACENAMIENTO SUBTERRÁNEO DE GAS NATURAL.....	13
5.7. PLAY ARENISCAS INFRABASÁLTICAS A LOS BASALTOS DE F. SERRA GERAL	13
5.7.1. CUALIDADES DEL RESERVORIO.....	13
5.7.2. CUALIDADES DE LA UNIDAD PROTECTORA O ROCA SELLO	14
5.8. DEFORMACIÓN Y DISPOSICIONES ENTRAMPANTES.....	15
6. LITOLOGÍA Y ESTRATIGRAFÍA REGIONAL	16
6.1. PERFILAJE DE POZOS–COLUMNA ESTRATIGRÁFICA.	18
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
8. CONCLUSIONES	24
9. BIBLIOGRAFÍA.....	25
10.ANEXO	28

1. INTRODUCCIÓN

En el contexto energético actual donde la participación de la generación de energía eléctrica de origen renovable vio un marcado incremento, con el consecuente aumento de los niveles de penetración en los sistemas sistema de energía eléctrica, éstos ven la necesidad de disponer de un sistema de energía de reserva para compensar la inestabilidad provocados por los altos niveles de inserción de la generación renovable. Adicionalmente, existen desequilibrios en la red de energía eléctrica producidos por el déficit en la generación que cubre la demanda estacional y que en ciertas épocas del año presenta un marcado desfase con respecto a la generación.

A tales efectos se plantea como posibilidad el almacenar a gran escala en el subsuelo hidrógeno gaseoso para su uso como combustible, para posteriormente ser reconvertido e inyectado a la red eléctrica. Satisfacer a la demanda, otorgar calidad y seguridad a la red eléctrica. La posibilidad de disponer de un combustible almacenado, para reconversión en electricidad, capaz de modular al sistema eléctrico es esencial en redes con generación renovables ya que éstos formarían parte de los activos como reserva de energía (back up) requeridos por estabilidad y seguridad de suministro.

Por tal motivo este trabajo se enmarca en el área de estudio de las características del subsuelo entrerriano, en cuanto a litología, estratigrafía, hidrogeología y en particular sus variables petrofísicas en concordancia a la geología regional. Por ende el análisis de los valores petrofísicos como permeabilidad y porosidad aquí estudiados, darán como resultado la viabilidad o pre factibilidad de la calidad o capacidad de las Formación Botucatú (F. Botucatú) y Miembro Solari (Mb. Solari) como unidades reservorio del hidrógeno gaseoso.

2. OBJETIVOS

Como objetivo principal se propone determinar y analizar los parámetros petrofísicos primarios y secundarios de la Formación Botucatú y Miembro Solari, consecuentemente determinar la aptitud de las Formaciones como posibles reservorios y roca sello de hidrógeno gaseoso.

3. METODOLOGÍA

Se plantea una serie de tareas secuenciales en base a los datos regionales disponibles, las que se describen a continuación:

- ✓ Análisis de la geología regional.
- ✓ Estudio de la litología, estratigrafía, análisis de columna estratigráficas, hidrogeología, hidroquímica
- ✓ Análisis registros de pozos-Perfilaje de pozos.
- ✓ Petrofísica de Formaciones geológicas en el sistema acuífero guaraní (SAG)

4. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

A nivel mundial el almacenamiento subterráneo de gas ha sido ampliamente explotado durante décadas, tanto para el gas natural como gas de ciudad o biogás, el cual contiene en fracción 60% de hidrógeno (H_2) y 40% de metano (CH_4) entre otros gases. En Francia, el acuífero de Beynes, arenisca no consolidada y permeabilidad entre 3 a 5 D (Darcies), se ha operado satisfactoriamente por más de 30 años con biogás, proveniente de los reactores de residuos sólidos urbanos y la operación de los pozos se realiza anualmente para cubrir la demanda de invierno, ciclos operativos técnico-económico posibles para el caso de acuíferos Fho et. al. (1979).

El proyecto de la unión europea HyUnder (2015), el cual tiene como objetivo el establecer la viabilidad de unidades formacionales como reservorios de hidrógeno gaseoso en Francia, España, Alemania, Rumania, Holanda e Inglaterra, a la vez de establecer las ventajas y oportunidades para distintos sectores de la economía para el almacenamiento de hidrógeno. En Argentina y en colaboración con el proyecto antes mencionado, se encuentra Hychico- Planta de Hidrógeno Diadema en Comodoro Rivadavia, provincia de Chubut. Ciudad en la cual se ha realizado el almacenamiento de hidrógeno gaseoso en pozos agotados de gas natural y en donde se consideraron valores de porosidad del orden de 25% y permeabilidad entre 300 a 500 mD como parámetros petrofísicos primarios Pérez et. al. (2017). En este caso, el gas (CH_4) inextraíble del pozo se utiliza como gas colchón o de base, el cual está encargado de mantener estable las presiones durante los regímenes de inyección / extracción de la mezcla de gases, es decir durante la operación del yacimiento. Al ser el gas de base existente al igual que la infraestructura de perforación y sus instalaciones asociadas, convierte a este sistema en el más viable técnicamente con respecto a los demás sistemas de almacenamiento subterráneo, a pesar de las modificaciones requeridas para la inyección del gas hidrógeno, como por ejemplo “embrittlement” o fragilización de los aceros por la reacción superficial con el hidrógeno.

H2STORE es el proyecto que investiga las variables petrofísicas, geofísicas y geoquímicas, mineralógicas, microbianas y la interacción o variación de éstas por la presencia de gas hidrógeno, particularmente en la superficie poral recubiertas por arcillas que eventualmente serán modificadas cambiando los cementos del clasto que es propiedad directa de porosidad y consecuentemente permeabilidad Henkel et. al. (2013), de ahí la importancia e estos parámetros a la hora de caracterizar formaciones geológicas aptas como reservorios. Se han considerados valores de porosidad mayor o igual a 10% y permeabilidad mayor a 300 mD, propuestos para rocas porosas de acuerdo a Matosa et. al. (2019). El estudio de viabilidad realizado en Portugal donde se evaluó las diferentes tecnologías de almacenamiento en subsuelo, como ser en depósitos de sal en pozos agotados y en acuíferos salinos; para este último, los resultados fueron satisfactorios para la posible implementación según Carneiro et. al. (2019), los valores petrofísicos obtenidos fueron de una porosidad de 15% y permeabilidad por encima de 200 mD.

En su informe Fho et. al. (1979) expone que el confinamiento de hidrógeno gaseoso podría ser de índole *estructural*, a través de determinadas configuraciones de fallas, cambios de facies o *litológico*, para la cual la retención del gas viene dada parcialmente por, rocas de baja permeabilidad, relacionada con el diámetro del poro en conexión o garganta, los que son muy pequeños generando elevadas presiones y por la saturación de agua en los poros, por el efecto de la capilaridad. Es decir que la retención se logra por diferencia de presión, se requiere de una presión mayor del gas a la presión del agua, denominada presión umbral, contenida en la garganta para desplazarla. De existir algún

desequilibrio de presiones durante los ciclos operativos y la presión del gas supera al del agua retenida en los poros se daría comienzo a los procesos de migración del gas a través de la roca sello. Este escape del gas a través de la capa protectora se considera como pérdida inevitable, incluso para otros gases, que para nuestro caso oscila entre el 2% del volumen total almacenado.

Adicionalmente, se pueden presentar otras pérdidas provocadas por la difusión del gas en el agua circundante, por disolución en el agua connata de los poros o agua irreducible por capilaridad, pero poco probables según Fho et. al. (1979) que lo describe como confinamiento hidrológico; y por los llamados "fingering". Es el efecto asociado a la inestabilidad generada cuando la movilidad del gas inyectado es mayor a la movilidad del agua desplazada (por diferencia de densidades de los fluidos), provocando que el gas penetre en el fluido desplazado, formándose una vía de escape para el gas irrecuperable Paterson (1983). Estas no son despreciables en comparaciones a las anteriores, como tampoco lo son las asociadas a la perforación Carden y Paterson (1979).

Las llamadas trampas litológicas o estructurales definidas por Sørensen (2007), en donde las presiones hidrostáticas del acuífero deben ser algo mayores que las presiones de almacenamiento del gas y el arreglo de facies deberían ser estructuras anticlinales "domos" preferentemente o facies onduladas de alturas pronunciadas capaz de contener o impedir el escape. A la vez de considerar que la inyección de gas en un acuífero se logra desplazando el agua de la formación porosa por medio del gas a una presión mayor que el agua circulante Bai et. al. (2014). Además, la presión capilar de los acuíferos hace que el agua irreducible de los poros (connata) favorezca a la roca sello de baja permeabilidad, minimizando la posibilidad de migración y que el gas de base utilizado es gas nitrógeno N₂, inerte actuando como si fuera una barrera entre el hidrógeno y el agua de la formación, minimizando así las pérdidas, por efecto de la solubilidad adicional a las de reacciones químicas en la interface sedimento-gas Pfeiffer et. al. (2017).

Las posibles reacciones químicas serían con el óxido férrico Fe₂O₃ (hematita) presente en la formación, convirtiéndose en óxido ferroso Fe₃O₄ más agua con un necesario incremento en la temperatura del reservorio o catálisis Fho et. al. (1979). Pero estudios realizados en Francia sobre la Formación Voges del triásico inferior, rocas sedimentarias (areniscas) ricas en cuarzos y feldespatos, se demostró a través de ensayos de laboratorio con núcleos de la formación, que después de un año de exposición en condiciones de reservorio, que solo se produjo una mínima reducción en la hematita con la consecuente liberación de hierro (ferromoscovita), con lo cual se puso en evidencia que no hubo alteración significativa de las características petrográficas de porosidad y permeabilidad Ebrahimiyekta (2017).

En los estudios económicos de Lord et. al. (2014), los costos de implementación de este sistema son superior en comparación con otros sistemas. Este incremento es debido en gran parte al volumen de gas nitrógeno N₂ de base requerido, el cual es de hasta un 80% del volumen del reservorio. Que la recuperación total afectaría considerablemente a la formación por lo que gran parte de éste quedará en la formación, por disolución en el agua connata de los poros; además, los ciclos de extracción que se proponen dependen de las características del reservorio, que es el que define los límites de extracción.

De acuerdo a Flesch et. al. (2018), las posibles alteraciones geoquímicas (agua y roca) que se podrían presentar en las formaciones o reservorios de rocas sedimentarias

solo los de sulfatos y calcitas como cementos, podrían con la salinidad adecuada del fluido circundante, disolverse y presipitarse alterando las propiedades petrofísica del reservorio, porosidad y permeabilidad, situación ésta poco probable para aguas poco salinas Pudlo et al (2018). En el programa de calculo propuesto por Li et. al. (2018), la solubilidad del hidrógeno baja a medida que aumenta la concentración de sales NaCl en las mismas condiciones de presión y temperatura, lo mismo sucede con otras sales presentes en la formación. Para aguas de muy baja salinidad la relacion de solubilidad con la presión y temperatura es una curva de pendiente positiva, con un punto particular en los 50° C, por debajo de este valor decrece y por encima aumenta De Lucia et. al. (2015).

El almacenamiento de hidrógeno en el subsuelo no representa un peligro potencial para el medio ambiente, ni sistemas acuáticos o terrestres Fho et. al. (1979). La demanda de energía podría ser cubierta en un 20% con el hidrógeno almacenado en el subsuelo del norte de Alemania, según los estudios realizados por simulación para diferentes escenarios por Pfeiffer et. al. (2015)

Actualmente existen restricciones respecto a este sistema de almacenamiento, como por ejemplo los relacionados con la migración del gas a travez de la roca sello, sobre el sistema de perforación (pozo) propiamente dicho y las fugas potenciales a travez de fracturas no detectadas. Otro aspecto es el de recciones bioquímicas y reacciones con otros minerales presentes en la formacion, aunque ya se ha manifestado en forma empirica que estas reacciones son mínimas. Pero aun así, se debe profundizar en la carcterización del acuífero, sobre todo sus propieddes petrofísicas, hidrodinámica y geometría Tarkowski (2019).

5. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

5.1. Conceptos básicos de petrofísica

En ingeniería de yacimientos los parámetros petrofísicos a considerar son fundamentalmente la porosidad y la permeabilidad, los que están en relación directa con el funcionamiento del yacimiento.

5.1.1. Porosidad (ϕ)

La Porosidad se define como la fracción del volumen total de la roca no ocupada por el esqueleto mineral de la misma Sylvain J. Pirson (1965). Pero en ingeniería de yacimientos representa la cantidad de fluido o gas que la roca puede albergar. Existen dos clases de porosidad, *total* y *eficaz*

La *porosidad total* (ϕ_{m_t}) es la relación que existe entre el volumen de los espacios vacíos con respecto al volumen total de la roca expresada en porcentaje. Aquí no se tiene en cuenta si los poros están interconectados entre sí o no, a esa interconexión o grado de interconexión se la denomina tortuosidad. Una roca puede tener una elevada porosidad pero sin una interconexión interporal apreciable, desmerece sus características para transmitir fluidos, como es el caso de las rocas ígneas o lávicas con porosidad vesicular.

Depende fundamentalmente de factores como forma, dimensión e interconexión de los poros; de la forma y redondez de los granos, selección, disposición o empaque, grado de cementación y compactación de la roca, por lo tanto, la porosidad total está fuertemente condicionada por estos factores.

El volumen de agua contenido en una roca, liberado por la acción de la gravedad, llamado volumen de agua V_g , está determinado por la *porosidad eficaz* (ϕ_{me}), que a su vez está determinada por la intercomunicación de los poros Custodio y Llamas (1983).

Esta propiedad, *porosidad eficaz*, es función directa de factores litológicos como ser, tamaño y empaque de granos; cementación; meteorización, lixiviación; contenido, cantidad y clase de arcillas, lo que indica estado de hidratación de las mismas (saturación de agua o mojabilidad).

La porosidad es una propiedad de las rocas, es así que la porosidad primaria y secundaria es debida a factores geológicos. En rocas sedimentarias por ejemplo, la porosidad primaria es el resultado de los vacíos entre los granos y fragmentos minerales post-sedimentación. La porosidad secundaria es causada por agentes geológicos, como ser lixiviación, fracturamiento o fisuración post-litificación y post-sedimentación. Las areniscas son las rocas más porosas y permeables, en las cuales la porosidad puede ser intergranular o de fractura Sam Boggs (2009). La primera es el espacio neto que queda después de que ha sido reducida la porosidad inicial por agentes geológicas de cementación, recristalización, granulación, molimientos, etc.. Para las areniscas la más significativa modificación de porosidad viene dada por la cementación, porque se alteran tanto en la porosidad original como el tamaño y forma de los granos que a su vez afectan los canales de interconexión por la deposición de cuarzo secundario (cemento de sílice), calcita y dolomita (cemento de carbonatos) y el contenido de arcillas no reduce notoriamente la porosidad, pero si le transfiere propiedades friables (quebradizo).

Siendo las expresiones matemáticas correspondientes,

$$\phi_{mt} = \left(\frac{V_r}{V_t} \right) * 100$$

$$\phi_{me} = \left(\frac{V_g}{V_t} \right) * 100$$

Donde:

ϕ_{mt} : porosidad total
 V_r : volumen de los poros
 V_t : volumen total de la roca

Donde:

ϕ_{me} : porosidad eficaz
 V_g : volumen de agua libre, gravífica
 V_t : volumen total de la roca

5.1.2. Permeabilidad (k)

La permeabilidad se define como la capacidad de un medio poroso al permitir el pasaje de un fluido. En base a experiencias en laboratorios la ley de Darcy describe, que el caudal de un líquido que se filtra a través de una sección de área bajo la acción de una carga determinado por un gradiente hidráulico es proporcional a la longitud de la sección, al área y un coeficiente K que depende de la naturaleza de los sedimentos, llamado coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica. Siendo su expresión matemática:

$$Q = K * A * \nabla i$$

Donde:

Q : caudal (m^3/s)
 A : area (m^2)
 ∇i : gradiente hidráulico
 K : permeabilidad de Darcy en (m/h)

De esta ecuación se deduce que la permeabilidad de Darcy es de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$K = \frac{c * d^2 * P_e}{\mu}$$

Donde:

K: permeabilidad de Darcy en (m/h)

C: constante adimensional

d^2 : superficie intragranular

P_e : peso específico (mg/dm³)

μ : viscosidad dinámica

De la expresión anterior despreciando los valores de viscosidad y peso específico para el agua de la formación en condiciones de presión y temperatura del acuífero, se deduce que:

La permeabilidad *específica o intrínseca* es una característica que depende exclusivamente de las características litológicas del acuífero, según su expresión matemática, Custodio y Llamas (1983). La unidad de la permeabilidad intrínseca es el cm² o m² y la derivada de la Ley de Darcy es el darcy por lo tanto: 1 Darcy es equivalente a $9,86923 \times 10^{-13} \text{ m}^2$

$$k = c * d^2$$

Esta última, es una de las expresiones matemáticas más utilizadas y en donde se puede ver la dependencia directa con el tamaño de canales interporales, textura granular y arcillosidad. Esta última, ejerce cambios en el taño o estructura del grano; comunmente se depositan sobre los canales interporales haciendo un efecto de sello disminuyendo la permeabilidad intrínseca. Los parámetros descritos anteriormente son agentes geológicos de alteración, además de la cementación considerado también como uno de los parámetros más incidentes.

Para el caso de movimientos verticales suele utilizarse la conductividad hidráulica (Ch) es el mismo concepto de la permeabilidad de Darcy (K).

$$k = Ch$$

La permeabilidad de Darcy es representativa de la conductividad de líquidos, pero existe una diferencia con respecto a la conductividad del mismo material poroso frente a flujos gaseosos, relacionado con el llamado efecto Klinkenberg, el cual pone de manifiesto fuerte dependencia que tiene la permeabilidad a gases con respecto a la presión, temperatura y densidad del gas.

La permeabilidad de Klinkenberg o permeabilidad a una presión infinita, se obtiene:

$$K^\infty = \frac{Ka}{1 + b/pm}$$

Donde:

K_{∞} : Permeabilidad correspondiente al valor de K_a pero a una presión infinita

K_a : Permeabilidad al aire a una presión promedio p_m

b : Constante que depende del tamaño de la abertura de los poros, aproximadamente en proporción inversa a los radios de los capilares

El término b/p_m es considerado como *factor de corrección* y para presiones medias elevadas o infinitas, la permeabilidad al aire se iguala a la permeabilidad a líquidos. Si se realizan varias mediciones para distintas p_m y se construye un gráfico con valores de K_a (ordenadas) y el valor de $1/p_m$ (abscisas) nos da una recta con intersección en el eje de ordenadas y obtenemos el valor de K_{∞} . Lo cual quiere decir que en este punto la permeabilidad del gas, a presiones muy elevadas, coincide con la permeabilidad de los líquidos. El valor de b es la pendiente de la recta y es mayor cuando menor es el peso molecular del gas, por lo tanto se obtiene una permeabilidad mayor a la misma presión para gases de menor peso molecular Fig 1.

De esta manera se pudo establecer, por ejemplo, que la permeabilidad al aire de rocas de acumulación compactas de muy baja permeabilidad (menor a 0,1 mD), está en el orden de 50% a 100% por encima de la permeabilidad al líquido.

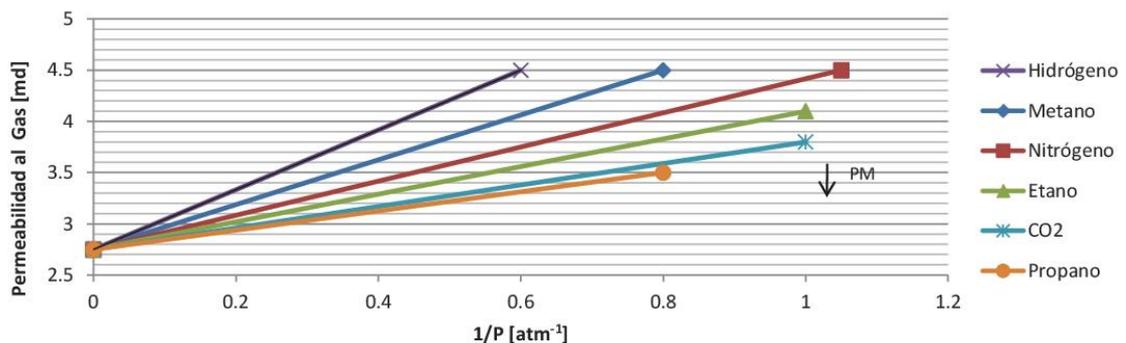


Fig.1 Efecto Klinkenberg para distintos gases sobre una muestra de roca, lato sensu Pérez (2012)

5.2. Características estructural y tectónica de las trampas

Las características de un yacimiento junto a su dinámica de funcionamiento o desempeño, se relaciona con su geometría y la relación con las formaciones geológicas vecinas. Por lo tanto, existen tres clasificaciones en base a su configuración geométrica, *Trampas estratigráficas, estructurales y combinación de estas*. Las primeras, se podrían definir como aquellas en donde la deformación estructural pos sedimentación, adquieren gran importancia sobre la acumulación, migración y retención de hidrocarburos. Las segundas, si bien son las más comunes y en particular los anticlinales (los más grandes reservorios a nivel mundial), se dividen en cuatro clases, según la deformación, cambios en el buzamiento, fallamiento o combinación de fallamiento y pliegues; estos últimos productos de los esfuerzos compresivos, intrusionales o por levantamiento de estratos más modernos. Finalmente, los cierres o confinamiento por fallamiento o en combinación con plegamientos

(pliegues), generan estructuras complejas y que en la gran mayoría de los yacimientos demuestran esa complejidad.

5.3. Geología regional

Nuestra provincia se ubica geográficamente dentro de la Mesopotamia, pero a la vez geológicamente forma parte de la cuenca Chaco paranaense argentina.

Dentro del marco tectónico y estructural de la región, queda conformada nuestra zona de estudio como La Platea Oriental, sistemas de bloques estructurales que controlan la inclinación de pendiente gradual ascendente hacia Río Uruguay. Situada al norte por el Alto de Asunción y al sur por el Alto Río de la Plata, dispuesta principalmente en el centro y norte de Entre Ríos.

A través de correlaciones hechas en afloramientos advertidos en la cuenca paranaense Brasil-Uruguay, junto con el análisis de perforaciones para explotación hidrotermal en Brasil, Uruguay y Argentina, se evidencian las *Formación Serra Geral* (Neojurásico – Eocretácico) y *Formación Botucatu* (Eojurásico - Neojurásico) presentes en Brasil y Argentina, las cuales parecerían ser las más antiguas y potentes de la región, de acuerdo a la geofísica y perfilaje de perforaciones.

El *Miembro Solari*, son psamitas clásticas continentales, conformando un conjunto de areniscas cuarzosas finas a mediana mayoritariamente, intercaladas o bien subyacentes inmediatamente a la Formación Serra Geral (F. Serra Geral) basáltica considerada como techo, conformando cuerpos areniscosos tipo “draas” o dunas simples pero de espesores de decenas de metros y de origen eólico (eoleanitas) Silva Busso (1999).

De acuerdo a Fernández Garrasino (1998) en su trabajo inédito e índole de correlación asociativo y sin comprobación geofísica, analiza la posibilidad de almacenamiento de gas natural en el subsuelo entrerriano, concluyendo con la factibilidad de prospección para tal fin, en los departamentos de Federación, Concordia, Colón y Concepción del Uruguay.

Adicionalmente el mencionado autor (op. cit.), como demostración teórica propone una serie de estudios de correlación con formaciones consideradas de interés como generadoras de hidrocarburos de la cuenca paranaense (Brasil, Paraguay y Uruguay) con formaciones regionales, las cuales posteriormente serán analizadas como posibles reservorios y sello en virtud de sus cualidades petrolíficas. A la vez, propone tres *Pleys* o sistemas petroleros hipotéticos a prospectar, los cuales se describen en detalle en apartados posteriores.

Seguidamente se comenzará por el estudio de las unidades formacionales generadoras de hidrocarburos de la cuenca paranaense de Brasil, Paraguay y Uruguay, objeto de correlación en Argentina que podrían tener incidencia sobre el territorio entrerriano y asociar las hipotéticas directrices de migración de hidrocarburos.

5.4. Antecedentes exploratorios de hidrocarburos.

Las unidades estratigráficas generadoras de hidrocarburos en la cuenca paranaense, ponen de manifiesto sobre el hallazgo de hidrocarburos en la Formación Ponta

Grossa (Devónico), areniscas conferidas a ésta formación en el pozo ASU en Paraguay e Iratí (Pérmico superior kazaniense) en Brasil, como las generadoras más importantes.

Las secuencias de generación, expulsión y migración se habrían llevado a cabo después de la depositación del Triásico-Jurásico Continental, es decir antes de las efusiones basálticas neojurásicas – eocretácicas de la *Formación Serra Geral* y posterior a la acumulación eojurásico – neojurásico temprano de la *Formación Botucatu*. Por lo tanto, el posible “cierre” de las secuencias de generación, expulsión y migración provenientes de las F. Ponta Grossa e Iratí se habrían dado durante el Cretácico Inferior Tardío.

Los hallazgos de hidrocarburos en vulcanitas y subefusivas de la *Formación Serra Geral* (Neojurásico – Eocretácico) presentes en la cuenca brasileña, evidencian migración en el post- Jurásico. Filones capa, mantos diabásicos y otros cuerpos subvolcánicos genéticamente relacionados con Formación Serra Geral, habrían adquirido porosidad y permeabilidad secundaria por diaclasamiento (fracturamiento sin deslizamiento) por enfriamiento y fractura tensional sobreimpuesta.

Adicionalmente a lo anterior, también a la cronología de generación, expulsión y migración, confieren a las unidades de entrapamiento perfeccionadas antes del Cretácico. En el subsuelo entrerriano la presencia de coladas basálticas neojurásicas – eocretácicas y cuerpos subefusivos cosanguíneos en gran parte del territorio, hacen suponer que habrían conferido efectos térmicos y cargas litostáticas que habrían favorecido a las secuencias de entrapamiento.

Dentro de los supuestos lineamiento de migración o directrices, podemos decir que para fluidos (agua e hidrocarburos) se realiza desde los lugares de mayor hacia los de menor presión y el traslado hacia sus disposiciones entrapantes. A la vez queda definido el vector de migración orientativo de los movimientos de hidrocarburos, con dirección desde los cuadrantes occidentales a orientales, pendiente arriba de la Platea oriental, hacia el río Uruguay y desde los límites australes del Alto de Asunción hasta los septentrionales de los Altos del Río de la Plata dentro del territorio provincial, conforme con la tectónica estructural.

5.5. Unidades formacionales con características de reservorios, posibles “Play petroleros”

Dentro del ámbito provincial hasta la fecha, ninguna perforación ha alcanzado niveles estratigráficos equivalentes a reservorios de edad neocarbónica, eopérmica tardía y neopérmica temprana del paleozoico, que en Brasil (Grupo Itararé) y Paraguay (Formaciones Río Bonito y San Miguel) han brindado abundante manifestaciones de gas y petróleo; a pesar de que en Paraguay oriental solo haya sido manifestaciones de la existencia del material oleogénico, no a niveles comerciales ni productivos como en la cuenca brasileña, poseedora de lutitas y pelitas consideradas como roca madre. De acuerdo a analogías realizadas con estas unidades, conjuntamente con lo expuesto en los párrafos anteriores y sumados a las supuestas directrices de migración, se proponen tres supuestos “plays” o sistemas petroleros, que se describen a continuación:

- Pelitas neopaleozoicas y eventualmente paleozoicas pre-carbónicas (generadoras) Subefusivas neojurásicas –eocretácicas (reservorio)
- Pelitas neopaleozoicas (generadoras) – Psamitas neopaleozoicas (reservorios)
- Pelitas devónicas (generadoras) - Psamitas devónicas (reservorios)

5.5.1. Play neopaleozoicos

Los depósitos psamíticos (areniscas) como reservorios datarían del carbónico y pérmico de distintos orígenes y geometrías lo que le otorgarían en parte, cualidades petrofísicas primarias y/o secundarias. En concordancia con analogías de modelos brasileños demuestran que éstas estarían relacionadas lateral y verticalmente con secuencias pelíticas, tales disposiciones circunstanciales favorecen a las supuestas unidades generadoras como así también a las de protección de fluidos, por la existencia de cubiertas impermeables sobre los reservorios de sedimentitas finas sobrepuestas a las psamitas.

Adicionalmente las relaciones laterales y verticales con secuencias pelíticas antes mencionada, está el hecho vinculado a la geomorfología con la “platea” oriental, la cual posee una pendiente arriba hacia el Este y una subida gradual sobre los bordes de los Altos de Asunción y Altos del Río de la Plata, donde se podrían perfeccionar los entrampamientos por la existencia de las flexuras antiformes distensivas de variados orígenes y acuñamientos primarios de los cuerpos psamíticos de geometría variable. Estos últimos, convergerían pendiente arriba sobre los tres elementos estructurales que habrían ejercido control tectosedimentario y paleogeográfico, por lo menos en los inicios de la sedimentación neopaleozoica de la región.

También es posible que los ascensos de los Altos (Asunción y Río de la Plata) se habrían producido en forma gradual y discontinua favoreciendo a la participación repetida en la reactivación de la sedimentación y las eventuales secuelas clásticas progradantes recurrentes de los cuerpos psamíticos neopaleozoicos, alternados con depósitos pelíticos marinos y de otros de diversos orígenes.

5.5.2. Play paleozoicos pre-carbónicos

Como se mencionó en el apartado anterior, los ascensos de los Altos, habrían favorecido a la participación de la reactivación de la sedimentación con eventuales secuelas clásticas “progradantes” generadoras de cuerpos psamíticos devónicos alternados con depósitos pelíticos marinos. Supuesto debido a la antigüedad emsiana, Devónico tardío inferior, asignada a los Altos de Asunción. Además de otras direcciones, desde los bordes australes de éste, límite provincial con Corrientes, estas psamitas devónicas habrían avanzado hacia el sur de Entre Ríos. Distintas instancias deformantes distensivas y poco intensas, habrían conferido a la unidad de areniscas cualidades petrofísicas secundarias por fracturación, adquiriendo de esta forma aptitudes como reservorio; vínculos vertical y horizontal con pelitas marinas precarbónicas las enmarca como posibles generadoras, a la vez de protectoras.

También aquí, como en el apartado anterior, por la pendiente de la Platea oriental y la disposición de los Altos, asunceño y de la Plata, los entrampamientos podrían perfeccionarse decisivamente tanto por las existencias de las flexuras antiformes de orígenes diversos no compresivas y por los acuñamientos primarios psamíticos de geometría variable.

5.5.3. Play cuerpos subefusivos neojurásicos –eocretácicos

Diques y otras variedades subefusivas, alojadas en secciones pelíticas paleozoicas (neopérmicas) con potencial oleogenético y posibles cualidades atribuibles a las litologías protectoras, relacionadas con el magmatismo neojurásico –eocretácico de Serra Geral, habrían adquirido características petrofísicas (porosidad y permeabilidad) por diaclasamiento de enfriamiento y fractura tensional sobreimpuesta.

Una causa probable habrían sido los procesos metasomáticos y/o diagenéticos a los que habrían estado involucrados tanto las intrusivas como las sedimentitas que las contienen. También, efectos de fracturación de diferentes orígenes que habrían proporcionado porosidad y permeabilidad secundarias a las subvulcanitas basálticas; como ser fracturación tensional en fajas axiales de pliegues antiformes, los cuales se habrían generado por asentamiento diferencial de los cuerpos en estado semisólidos; fracturación tensional por enfriamiento gradual y subsiguiente contracción de los cuerpos subefusivos; fracturas sobre los filones diabásicos posiblemente ocasionada por la irregularidad magmática, variaciones de régimen de flujo, ocasionando diferentes espesores subefusivos por diferentes velocidades de enfriamiento y distintos importes de contracción; y por último, fracturas adicionales por asentamiento diferencial, a causa de espesores irregulares al final del enfriamiento.

5.6. Plays relativos al almacenamiento subterráneo de gas natural

Unidad protectora: basaltos de la formación Serra Geral, Neojurásico-Eocretácico, sobrepuesto a las areniscas del reservorio.

Reservorio: secciones psamíticas estimadas jurásicas-preneojurásica tardía de la Formación Botucatú y unidades más antiguas, con significativas componentes eólicas, inmediatamente subyacentes a los basaltos de Serra Geral. También el Mb. Solari como Intertraps de Serra Geral o subyacente a ésta.

Del estudio de registros de perforaciones de pozos termales realizadas en Federación, Concordia y Villa Elisa, se puede apreciar que el techo del reservorio se encuentra entre 870 y 968 m.b.b.p. Inmediatamente sobre impuesta se encuentran los derrames basálticos, con algunas intercalaciones sedimentarias y espesores de los tramos vulcanoclásticos comprendidos entre 592 y 908 m.

5.7. Play areniscas infrabasálticas a los basaltos de F. Serra Geral

5.7.1. Cualidades del reservorio

A través de la perforación del pozo Federación 1, desde los 870 a los 1260 m.b.b.p. se puede apreciar la dominante presencia de areniscas cuarzosas finas a muy finas, de buena y muy buena selección, friables y cuyos individuos más frecuentes son redondeados y sub-redondeados a subangulosos, datación anterior al Cretácico. Estos atributos composicionales y estructurales, sumado a la inmediata yacencia debajo del conjunto lávico conferidas a Formación Serra Geral (neojurásico-eocretácico), y también por razones de proximidad geográfica y vinculaciones regionales, inducen a correlacionar a estas psamitas, con las facies eolianitas de la Formación Botucatú (Brasil) y Formación Rivera (Uruguay). Así mismo estas dos unidades presentan apoyo a los basaltos de la Formación Arapey (

Uruguay) y Serra Geral (Brasil) con depósitos atribuidos al eo-neojurásico, situación similar se encuentra en el pozo Concordia 1, inmediatamente debajo de la formación Serra Geral.

Por otra parte en el pozo Federación 1 a partir de los 1180 m.b.b.p hasta el fondo a 1260 m.b.b.p, se aprecian 80 m de cambio en la litología por la aparición de areniscas limosas y limos, tal vez debido a la influencias de medios subácueos, insinuando cambios en la sedimentación, las que serían correlacionables por su equivalencia con la Formación Tacuarembó (Uruguay) y Piramboiá (Brasil) y también al Grupo Rosario do Sul (ex Formación Rosario do Sul), todas con datación en el mesotriásico ladinianos - eojurásicos.

Estos binomios formacionales Piramboiá- Botucatu (Brasil) y Tacuarembó-Rivera (Uruguay), mayoritariamente psamíticos poseen muy buenas cualidades petrofísicas como reservorio, ya que los mismos son proveedores de aguas termales y potables, conformando el acuífero Guaraní del Mercosur, hecho que afirmaría la eficacia como reservorio. Fernández Garrasino (1998)

5.7.2. Cualidades de la unidad protectora o roca sello

Se refiere a la unidad basáltica neojurásica-eocretácica de Formación Serra Geral, que se ubica por encima de las unidades supuestas como reservorios, descritas en el párrafo anterior.

Posiblemente, efusiones y derrames de lavas de ésta formación habrían estado afectadas por la disrupción y fragmentación gondwánica a fines del jurásico, directamente vinculados con el fallamiento regional. Como consecuencia los basaltos de mayor antigüedad estarían posiblemente más fracturados, por el hecho de las dislocaciones posteriores a los derrames más antiguos, que los basaltos más modernos menos fracturados, confiriéndoles aptitudes protectoras. Pero la posibilidad de existencia de diaclasas (fracturas poco visibles) de enfriamiento y fracturas tensionales en fajas axiales de pliegues antiformes, otorgándoles bajos límites de ruptura, hacen presuponer la ineficiencia como unidad protectora. Otro hecho desmerecedor, es que parte de las producciones hídricas del subsuelo del Este entrerriano provienen de secciones fracturas y permeables de las sucesiones vulcanoclásticas de F. Serra Geral- Mb. Solari, sobrepuestas a las areniscas acuíferas (F. Botucatu). De acuerdo a Silva Busso (1999), esta unidad presentaría como cuerpos areniscosos lentiformes posiblemente situadas en la formación o interfase, de una geometría extensa horizontalmente y de unas decenas de metros verticalmente. De hecho, el Mb. Solari en algunas zonas (zona embalse Salto Grande, F. Puerto Yerúa) puede presentarse intercalada o inmediatamente subyacente a la F. Serra Geral.

Pero, durante las perforaciones de pozos termales en la zona no se registraron pérdidas de circulación de los lodos, caídas significativas de su densidad o entrada de agua de la formación con el consiguiente ascenso de nivel en piletas; no se manifestaron derrumbes de paredes ni se advirtieron cronometrías que reflejen debilidad mecánica del terreno; y considerando las buenas condiciones dinámicas de surgencia en boca de pozo, a pesar de los mantos volcánicos, indicando cierto grado de resguardo de presiones. Además, principalmente la recarga del sistema hidrogeológico pre-Serra Geral de la Mesopotamia argentina, se llevaría a cabo por infiltración a través de los afloramientos uruguayos, de las areniscas infrabasálticas porosas y permeables de las F. Botucatu y Piramboiá, unidades correlacionadas por Silva Busso (1999)

Tales circunstancias atribuibles al conjunto neojurásico-eocretácico, sumado al hecho de que la potencia de estas secuencias efusivas-sedimentarias oscilan entre 592 a 908 m., harían considerar su eventual capacidad como sello Fernández Garrasino (1998)

5.8. Deformación y disposiciones entrampantes

Para las posibilidades de almacenamiento de gas natural en el subsuelo provincial Fernández Garrasino (1998), no basta solo con el análisis y determinación de las características petrofísicas otorgadas a las formaciones como reservorio y como sello o cubierta protectora, las cuales harían a la vez de sitio de confinamiento del gas o fluido albergado; de acuerdo a su disposición estructural conformante de la trampa asociados a las formaciones, las que habrían adquirido características de entrampamiento a través de deformación continua, desarrolladas posiblemente a partir del post-proterozoico, confiriéndoles rasgos distensivos. Lo que nos lleva a la posible existencia de pliegues antiformes no compresivos que pudieron haber sido originados por: movimientos vertical del sustrato cristalino (*morfología: pliegues en caja o ataúd*); compactación diferencial causada por la variación del espesor original de las secciones pelíticas del sustrato, por subsidencia real o relativa y sincrónica con la sedimentación (*morfología: en cortina o drape folds*) y por arrastre inverso (*roll-over folds*), que suelen afectar mayoritariamente a litologías no excesivamente competentes o rígidas. A excepción del último, éstos suelen ser idiomórficos, es decir, geográfica o regionalmente asilados de considerable magnitud y sin guardar proporción con estructuras sinformes (sinclinal). A modo de ejemplo y en un esquema sin escala se expone el ordenamiento formacional donde se presentas diques, filones e Intertraps o intercalación sobre F. Serra Geral Fig. 2.

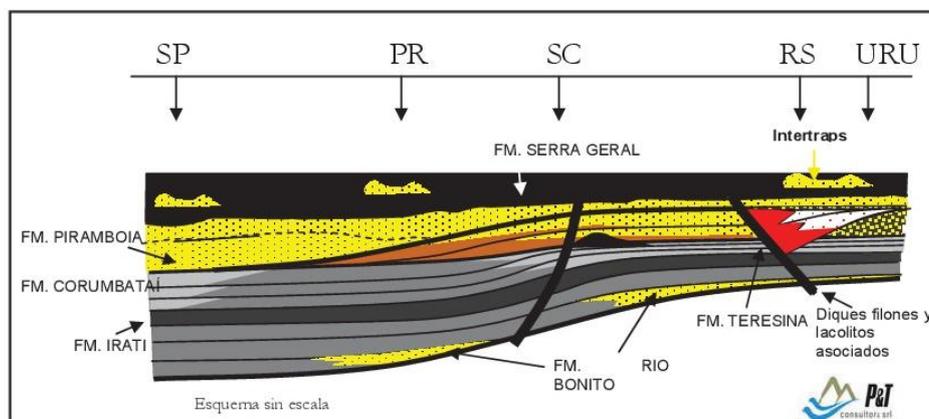


Fig. 2 Esquema del ordenamiento formacional, lato sensu Aguirre, Blanco Ibáñez, et. al. (2008)

En términos generales en el subsuelo entrerriano se ha reconocido un conjunto de características y anomalías estructurales cuya principal interpretación realizada por los diversos autores ha sido generalmente mediante la consideración de que la fragmentación estructural, en forma de bloques del subsuelo entrerriano, está relacionada con fallamientos profundos vinculados con las génesis tectónica y volcánica del subsuelo entre el Jurásico medio y Cretácico inferior, e incluso aquellos pre-godwanicos y relacionados con el basamento cristalino de la cuenca. Silva Busso (1999) plantea que en esta región de la Cuenca Chacoparanense, (Entre Ríos - Uruguay) las estructuras de bloques en profundidad

consecuentes del evento tecto-efusivo que originó las vulcanitas de la Formación Serra Geral tienen expresión, al menos, en los niveles mesozoicos infrabasálticos y muy posiblemente haya condicionado los procesos de sedimentación de gran parte de los depósitos suprabasálticos más modernos. Esta interpretación permitió adoptar como probable un control estructural sobre la geometría de los acuíferos contenidos en las Formaciones Serra Geral y Botucatu, considerándose este modelo estructural como posible para el Sistema Acuífero Termal de la Cuenca Chacoparanense Oriental Argentina Silva Busso y Fernández Garrasino (2004).

En base a lo anterior, dicho autor (op. cit.) propone que la región se vería afectada por al menos tres sistemas de lineamientos estructurales; uno transcurrente de rumbo NO-SE; uno normal de rumbo NE-SO y uno normal de rumbo N-S. Este control estructural controla la estratigrafía y es la base para una adecuada interpretación de la geología mesozoica en profundidad de la región y en el área de estudio.

Fernández Garrasino (2008) propone un modelo de inversión tectónica. Este modelo prevé un cambio en las condiciones tectónicas regionales de distensivas a compresivas. La expresión más sencilla de inversión tectónica se constituye a partir de rechazos variables, en un sistema distensivo inicial de bloques rotados. Este modelo por sí mismo podría crear eventuales flexuras inducidas por el ascenso de primitivos bloques bajos de fallas directas originales. Tomando la denominación de Fernández Garrasino (2008.) podemos llamar a estos modelos de lineamientos estructurales de "Filiación Andina".

Este modelo prevé dos tipos de condiciones, una las tectónicas regionales compresivas y una segunda de tipo post-deposicionales. La primera relacionada con la tectónica compresiva se constituye a partir de flexuras antiformes inducidas por movimientos de componente vertical dominante, explicables por reactivaciones generadoras de inversiones tectónicas de fallas originalmente directas, cuyos primitivos bloques bajos fueron ascendidos merced a esfuerzos compresivos. Silva Busso et. al. (2011) toma estos conceptos para la realización de las interpretaciones estructurales suprabasálticas del subsuelo entrerriano proponiendo que la reactivación por inversión controla la sedimentación de los niveles plio-pleistoceno fluviales y contribuye a cerrar fallas y fracturas.

6. LITOLOGÍA Y ESTRATIGRAFÍA REGIONAL

Como se mencionó en apartados anteriores nuestra región de estudios (posibles Plays) se reduce al análisis formacionales que involucran a los departamentos de Federación, Concordia, Colón y Concepción del Uruguay.

A través de las perforaciones de pozos para explotación hidrotermal en Federación 1, Concordia 1, Colón 1, Villa Elisa 1 y Concepción del Uruguay 1, respectivamente, se obtuvieron características de la litología, petrografía y composición mineralógicas de las formaciones atravesadas por el trépano. Las mismas corresponden a secciones de vulcanoclásticas de la Formación Serra Geral y sus Miembros Posada y Solari. Mientras que en Federación 1, Concordia 1 y Villa Elisa 1 se llegaron a atravesar a las Formaciones Botucatu y Piramboia; las cuales, a través de las muestras de pozos, recortes de perforación, observación de grano suelto, granometrías y perfilajes se pudieron obtener los pases de formación y potencias de las mismas, en particular el binomio Botucatu-Piramboia Silva Busso et. al. (1999) las cuales se detallan en párrafos subsiguientes.

Formación Serra Geral

Mantos efusivos basálticos tholeíticos y rocas clásticas intercaladas, refiriéndose a sus dos miembros Posadas (vulcanitas) y Solari (psamitas clásticas) con diques y filones capa diabásicos cuarzosos. El mismo aparece recristalizado rellenando intersticios de la roca o micro fracturas y oquedades junto a micropegmatita y horblenda.

Miembro Posadas

Conjunto efusivo basáltico con areniscas interestratificadas, interpuesto a Serra Geral, con coladas que presentan aporte inferior denso y alveolos en la parte superior. De composición tholeítica (hiposilíceas) de color gris oscuro o rojo grisáceo, con 50% de labradorita acida con alteraciones de montmorillonita y caolinita, un 45% de piroxeno augita o pigeonita y el 5% restante de olivina, cuarzo, material vítreo y opacos. Los alveolos contienen generalmente zeolitas, calcita y clorita. Las arcillas frecuentemente asociadas como caolinita-saponita-griffithina.

Miembro Solari

Secciones clásticas continental interpuesta y/o interdigitada y vinculada lateralmente a la F. Serra Geral. Dentro de ésta, secciones psamíticas y pelíticas laminadas o cuerpos areniscosos conformando "draas" o dunas simples. Areniscas con granometrías de fina a mediana (eolianitas), de color rojo oscuros, pardo rojizo y pardo claro, composición cuarzosa (93% a 98%), individuos redondeados y subredondeados. El resto del porcentual corresponde a láminas de Feldespatos potásicos con abundante ortosa y con plagioclasas subordinadas.

Formación Botucatu

Secciones clásticas, mayormente psamitas de *granometrías medias a finas*. Sedimentitas compuestas de areniscas rojas-ocre y rojo-amarillento pálido, granometrías finas a muy finas con tamaño medio de partículas, de poca matriz, poco consolidada, friable, de muy buena selección y escaso cemento carbonático con un recubrimiento de pátina delgada de óxido de hierro.

Mineralógicamente la muestra está compuesta basicamente de *cuarzo* incoloro (de 70% a 85% aproximadamente), particulado redondeados, subredondeados y subangulosos en buena proporción. *Feldespatos* (minerales tecto-aluminosilicatos: ortoclasa ($K(Al_2Si_2O_6)$), albita ($Na(Al_2Si_2O_6)$) y anortita ($Ca(Al_2Si_2O_6)$)) alcalinos y potásicos (en un 10% a 15 % aproximadamente) con partículas subredondeados, angulosos subangulosos, presentan maclado según la ley de Carlsbad. Recubiertas aparentemente por la alteración de carbonatos y arcillas caoliníticas y por una pátina de óxido de hierro. *Micas* en un 5% del tipo moscovita (micas aluminicas) o sericita, planares o laminares y angulosos, de la alteración de los feldespatos. Se observa *opacos* rojizos (óxidos) prolados y subredondeados.

Formación Piramboia

Particularmente psamitas de *granometrías de finas a muy finas con niveles intercalados de limo-arcillosos*. Sedimentitas compuestas de areniscas limosas rojizas, granometrías finas a limo, de poca matriz, poco consolidada, friable, de muy buena selección y cemento carbonático con un recubrimiento de pátina de óxido de hierro.

Mineralógicamente la muestra está compuesta de *cuarzo* incoloro (de 60% a 70% aproximadamente), particulado redondeados, subredondeados y subangulosos en buena proporción. *Feldespatos* alcalinos (en un 15% a 25 % aproximadamente), partículas subangulosas, recubiertas aparentemente con carbonatos y arcillas caoliníticas y por una pátina de óxido de hierro. Plagioclasas (feldespatos de Na y Ca) en un 5% con particulado

anguloso, incoloro y maclado según la ley de Albita. *Mica* del tipo moscovita (micas aluminicas) en un 5%. El 5% restante lo componen los *opacos* rojizos (óxidos). Se observa un mineral que podría tratarse de Epidoto (mineral sorosilicato de Ca, Al, y Fe). Esta última unidad podría conformar también una capa sello, pero infrapuesta al reservorio.

6.1. Perfilaje de pozos–columna estratigráfica.

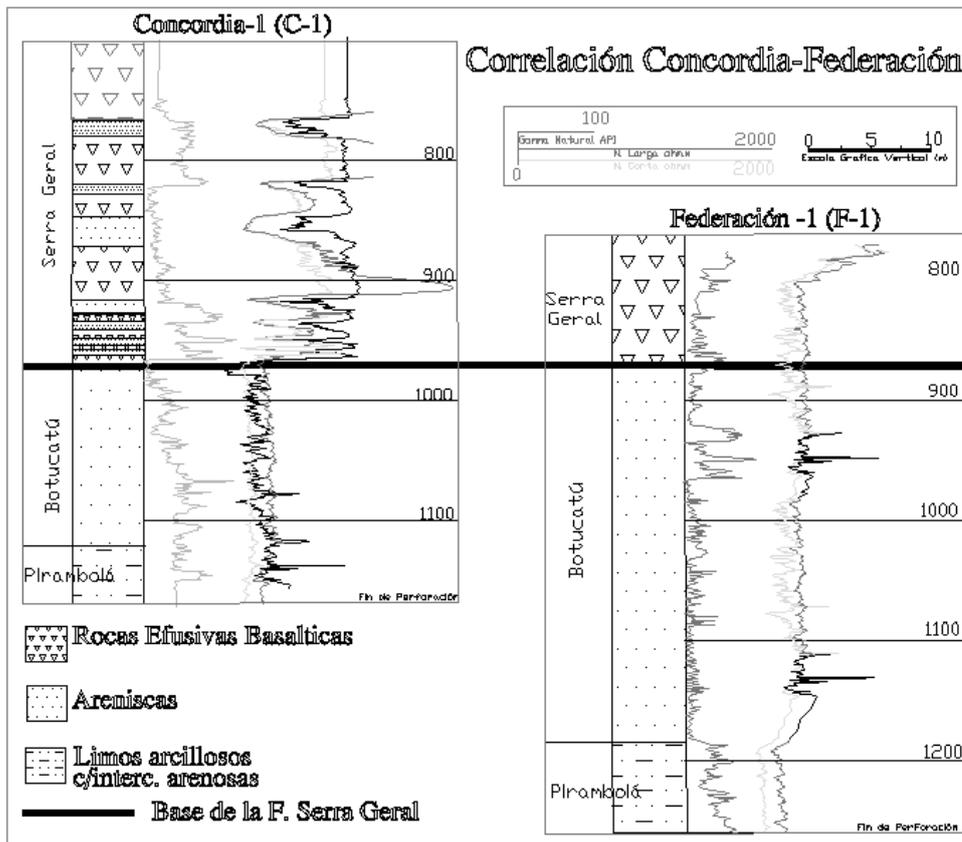


Fig. 3 Correlación de perfilajes entre Pozos Concordia –1 y Federación-1. lato sensu Silva Busso- Fernandez Garrasino (2004)

El análisis del perfilaje de pozos ha dado lugar a correlaciones formacionales como así también datos en potencia y pases de las mismas Fig. 3. Observamos que el registro de la izquierda es el de gama natural y el de la derecha es el resistivo, representa en detalle la estratigrafía y potencias de las formaciones.

Del estudio petrográfico del Acuífero Guaraní realizado Aguirre, Blanco Ibáñez et. al.(2008) para las formaciones de interés, se extrajeron datos de porosidad, cementación, texturas, porosidad visual Fig.4, 5, 6 y 7. Esta última, corresponde a la formación Tacuarembó en Uruguay homónima de F. Botucatú en Argentina, como lo es Formación Arapey homónima de F. Serra Geral. Los ensayos petrofísicos fueron realizados con muestras de afloramientos sin fracturas y los ensayos de permeabilidad se realizaron con gas nitrógeno.

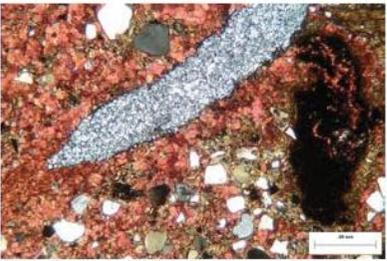
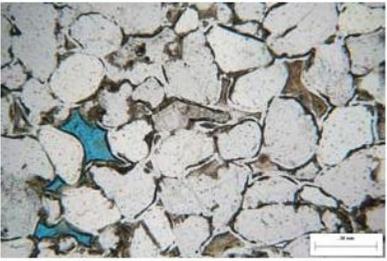
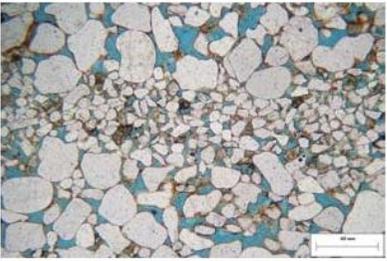
MUESTRA FOTOGRAFIA	CLASIFICACION TEXTURA	CLASTOS	MATRIZ	CEMENTO	POROSIDAD	OBSERVACIONES	DIAGENESIS
 <p>11323 (Fm. Yeruá)</p>	<p>Calcreta-silcreta* . Clastos de arena fina a grava cementados por calcita y calcedonia.</p>	<p>30% Cuarzo: 100%</p>	<p>5% Arcillosa infiltrada. Frecuentes coatings arcillosos en cutanes impregnados con hematita.</p>	<p>65% Calcita esparítica en mosaico: 49%. Calcedonia: 15%. Hematita: 1%</p>	<p>—</p>	<p>Paleosuelo. Presenta fuerte bioturbación, rizolitos reemplazados por calcedonia, concreciones de hematita, calcita como relleno de poros y reemplazo, nódulos calcíticos.</p>	
 <p>11314 (Fm. Serra Geral-Mb. Solari)</p>	<p>Arenita cuarcítica. Arena muy fina a fina (0.10-0.15 mm). Clastos redondeados. Muy bien seleccionada.</p>	<p>77.5% Cuarzo: 98% (monocristalino) Líticos: 2% (metacuarcitas)</p>	<p>--</p>	<p>13.5% Calcedonia: 7%. Opalo: 4%. Crecimiento secundario de cuarzo: 2%. Caolinita: 0.5%.</p>	<p>9% Secundaria. Moderadamente homogénea. Predominan los mesoporos (0.12-0.20 mm). La textura predominante es la intergranular reducida.</p>	<p>La silificación probablemente relacionada a procesos de circulación de aguas meteóricas, pedogénicos y/o evaporíticos.</p>	<p>Crecimiento secundario de cuarzo. Caolinita. Disolución. Calcedonia/ópalo.</p>
 <p>11329 (Fm. Botucatú)</p>	<p>Arenita cuarcítica. Presenta una alternancia de láminas de arena media a gruesa (0,48-0,70 mm) y arena muy fina (0,09-0,12 mm). Clastos redondeados. Selección buena a moderada.</p>	<p>67% Cuarzo: 98% Feldespatos: 1%. Líticos: 1% (sedimentarios)</p>	<p>2% Arcillosa de origen infiltrado (esmectita). Impregnada de hematita.</p>	<p>1% Hematita: 0.5%. Clorita: 0.5%.</p>	<p>30% Primaria y secundaria subordinada. Predominan macroporos (0.35-0.45 mm) y mesoporos subordinados. La textura predominante es intergranular.</p>	<p>Contactos suturados entre clastos. Cutanes arcillosos. Puentes de arcillas y fábricas geopetales.</p>	<p>Infiltración. Hematita. Compactación. Clorita.</p>

Fig.4 ESTUDIO PETROGRAFICO: ACUIFERO GUARANI (Argentina – F. Yeruá y Serra Geral; Paraguay F. Botucatú) lato sensu Aguirre, Blanco Ibáñez et. al. (2008)

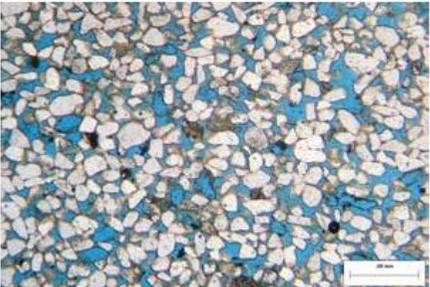
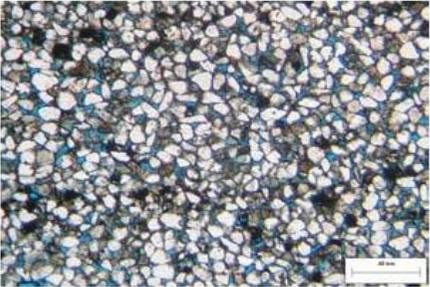
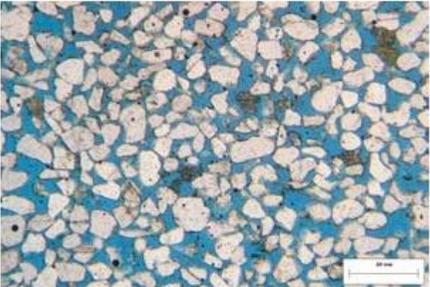
MUESTRA FOTOGRAFIA	CLASIFICACION TEXTURA	CLASTOS	MATRIZ	CEMENTO	POROSIDAD	OBSERVACIONES
 <p>11289 (Fm. Tacuarembó-Mb. Sup?)</p>	<p>Arenita subfeldespática. Muy fina a fina (0,10-0,20 mm). Bien seleccionada. Clastos subredondeados a redondeados. Empaque abierto.</p>	<p>67% Cuarzo: 87% Feldespatos: 10,5% Líticos: 2,5% (metamórficos, microcristalinos no diferenciados)</p>	<p>1% Arcillosa, como recubrimiento de granos.</p>	<p>--</p>	<p>32% Secundaria y primaria. Distribución homogénea. Tamaño mesoporos (0,07-0,20 mm), subordinados macroporos y microporos. Textura predominante intergranular, subordinadas intragranular y móldica.</p>	<p>--</p>
 <p>11397 (Fm. Tacuarembó-Mb. Sup.)</p>	<p>Arenita subfeldespática. Muy fina a fina (0,10-0,16 mm). Bien seleccionada. Clastos subredondeados a redondeados. Empaque intermedio.</p>	<p>77% Cuarzo: 89% Feldespatos: 8% Líticos: 3% (metamórficos, microcristalinos no diferenciados)</p>	<p>1,5% Arcillosa, como recubrimiento de granos, con tinción de hematita.</p>	<p>1,5% Hematita como coatings.</p>	<p>20% Secundaria, subordinada primaria. Distribución homogénea. Tamaño microporos (0,05-0,06 mm), subordinados mesoporos. Textura predominante intergranular, subordinadas móldica e intragranular.</p>	<p>--</p>
 <p>11408 (Fm. Tacuarembó-Mb. Sup.)</p>	<p>Arenita subfeldespática. Fina a media (0,17-0,37 mm). Moderadamente bien seleccionada. Clastos subredondeados. Empaque abierto.</p>	<p>64% Cuarzo: 88% Feldespatos: 7% Líticos: 5% (metamórficos)</p>	<p><0,5% Arcillosa, como recubrimiento de granos.</p>	<p>0,5% Crecimiento secundario de cuarzo.</p>	<p>35% Secundaria y primaria. Distribución homogénea. Tamaño mesoporos (0,10-0,25 mm), subordinados macroporos y microporos. Textura predominante intergranular, subordinada intragranular y móldica.</p>	<p>Láminas de arenita muy fina.</p>

Fig.5 ESTUDIO PETROGRAFICO: ACUIFERO GUARANI (Uruguay, F. Tacuarembó y Buena Vista) lato sensu Aguirre, Blanco Ibáñez et. al. (2008)

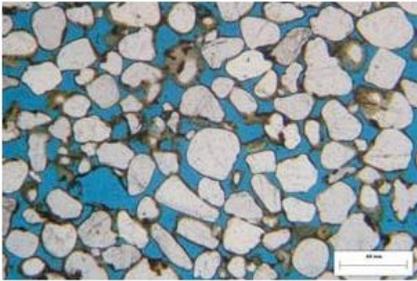
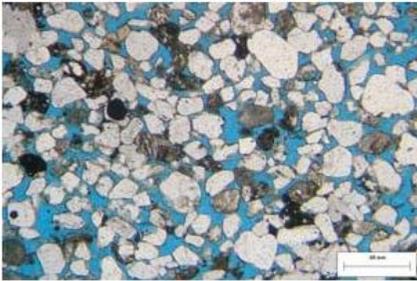
MUESTRA FOTOGRAFIA	CLASIFICACION TEXTURA	CLASTOS	MATRIZ	CEMENTO	POROSIDAD	OBSERVACIONES
 11415 (Fm. Tacuarembó-Mb. Sup.)	Arenita subfeldespática. Media (0,30-0,50 mm). Moderadamente bien seleccionada. Clastos redondeados a bien redondeados. Empaque abierto.	61% Cuarzo: 91% Feldespatos: 6% Líticos: 3% (metamórficos, escasos microcristalinos no diferenciados)	3% Arcillosa, como recubrimiento de granos, con tinción de hematita.	2% Hematita como coatings.	34% Secundaria y primaria. Distribución homogénea. Tamaño mesoporos (0,15-0,24 mm), subordinados macroporos. Textura predominante intergranular, subordinadas intragranular y móldica.	--
 11276 (Fm. Tacuarembó-Mb. Inf.)	Arenita subfeldespática. Fina a media (0,16-0,28 mm). Bien a moderadamente bien seleccionada. Clastos subredondeados a redondeados. Empaque abierto.	69% Cuarzo: 80% Feldespatos: 14% Líticos: 6% (metamórficos, granitos, microcristalinos no diferenciados)	3% Arcillosa, como recubrimiento de granos.	--	28% Secundaria. Distribución homogénea. Tamaño mesoporos (0.08-0.20 mm), subordinados microporos y macroporos. Textura predominante intergranular, subordinadas móldica e intragranular.	Láminas de arena muy fina a limo con matriz arcillosa. Escasa tinción de óxidos.
 11286 (Fm. Tacuarembó-Mb. Inf.)	Arenita subfeldespática. Muy fina a fina (0,070-0,14 mm). Moderadamente bien seleccionada. Clastos subredondeados a redondeados. Empaque intermedio.	71,5% Cuarzo: 78% Feldespatos: 20% Líticos: 2% (microcristalinos no diferenciados)	5% Arcillosa, como recubrimiento de granos y relleno de poros.	<0,5 Crecimiento secundario de cuarzo.	23% Secundaria y primaria. Distribución homogénea. Tamaño microporos (0,03-0,06 mm), subordinados mesoporos. Texturas predominantes intergranular y móldica.	Sectores con concentración de óxidos.

Fig.6 ESTUDIO PETROGRAFICO: ACUIFERO GUARANI (Uruguay, F. Tacuarembó y Buena Vista) lato sensu Aguirre, Blanco Ibáñez et. al. (2008)

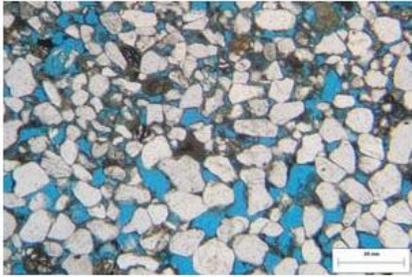
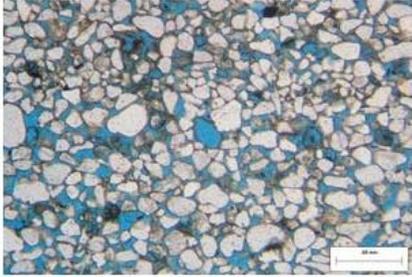
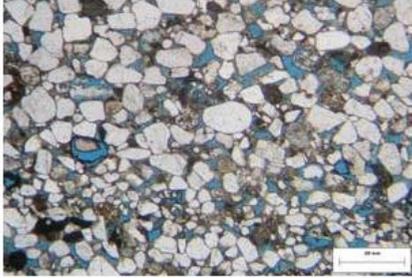
MUESTRA FOTOGRAFIA	CLASIFICACION TEXTURA	CLASTOS	MATRIZ	CEMENTO	POROSIDAD	OBSERVACIONES
 <p>11389 (Fm. Tacuarembó-Mb. Inf.)</p>	<p>Arenita subfeldespática. Fina a media (0,20-0,35mm). Moderadamente bien seleccionada. Clastos subredondeados a redondeados. Empaque abierto.</p>	<p>69% Cuarzo: 80% Feldespatos: 8% Líticos: 12% (metamórficos, granitos, arenitas)</p>	<p>3% Arcillosa, como recubrimiento de granos.</p>	<p>--</p>	<p>28% Secundaria y primaria subordinada. Distribución homogénea. Tamaño mesoporos (0,10-0,24 mm), subordinados macroporos y escasos microporos. Textura predominante intergranular, subordinadas intragranular y móldica.</p>	<p>--</p>
 <p>11403 (Fm. Tacuarembó-Mb. Inf.)</p>	<p>Arenita subfeldespática. Muy fina a fina (0,10-0,17 mm). Moderadamente bien seleccionada. Clastos subredondeados a redondeados. Empaque abierto.</p>	<p>70,5% Cuarzo: 86% Feldespatos: 10% Líticos: 4% (metamórficos)</p>	<p>1,5% Arcillosa, como recubrimiento de granos. Escasa tinción con hematita.</p>	<p>--</p>	<p>28% Secundaria, subordinada primaria. Distribución homogénea. Tamaño mesoporos (0,09-0,20 mm), subordinados microporos. Textura predominante intergranular, subordinadas móldica e intragranular</p>	<p>Láminas de arenita fina.</p>
 <p>11449 (Fm. Tacuarembó-Mb. Inf.)</p>	<p>Arenita subfeldespática. Fina a media (0,20-0,30 mm). Bien seleccionada. Clastos subredondeados a redondeados. Empaque intermedio a abierto.</p>	<p>75% Cuarzo: 78% Feldespatos: 12% Líticos: 10% (metamórficos, volcánicos riolíticos?, granitos)</p>	<p>2% Arcillosa, como recubrimiento de granos.</p>	<p>--</p>	<p>23% Secundaria y primaria. Distribución homogénea. Tamaño mesoporos (0,08-0,15 mm), subordinados microporos y macroporos. Textura predominante intergranular, subordinadas intragranular y móldica.</p>	<p>Láminas de arenita muy fina y láminas de arenita media.</p>

Fig.7 ESTUDIO PETROGRAFICO: ACUIFERO GUARANI (Uruguay, F. Tacuarembó y Buena Vista) lato sensu Aguirre, Blanco Ibáñez et. al. (2008)

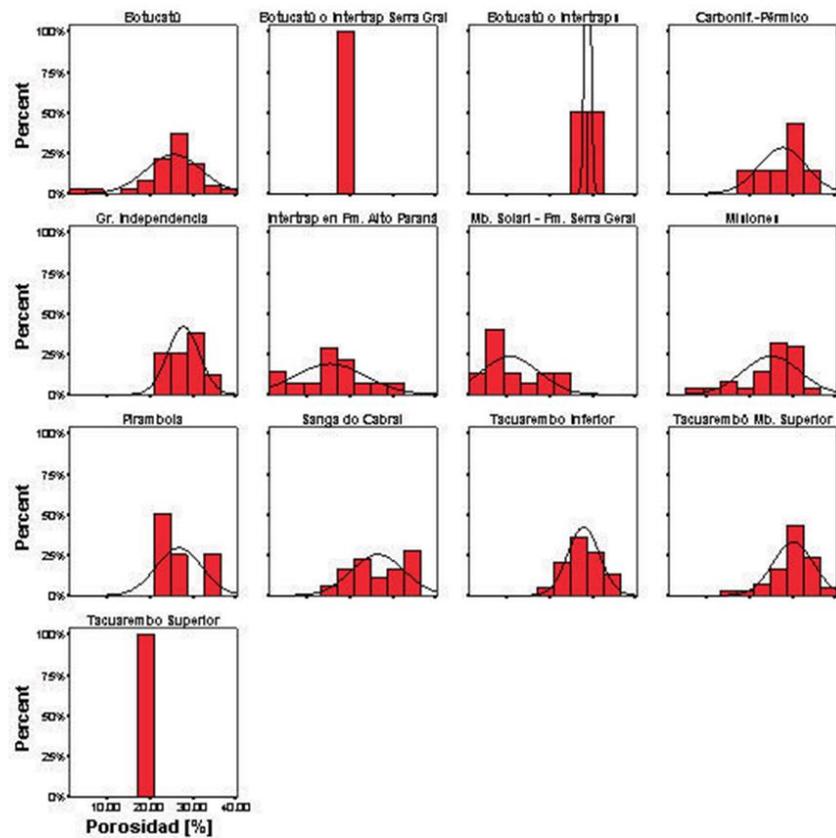


Fig. 8 RESUMEN ESTADÍSTICO DE POROSIDADES POR FORMACION
lato sensu Aguirre, Blanco Ibáñez et. al. (2008)

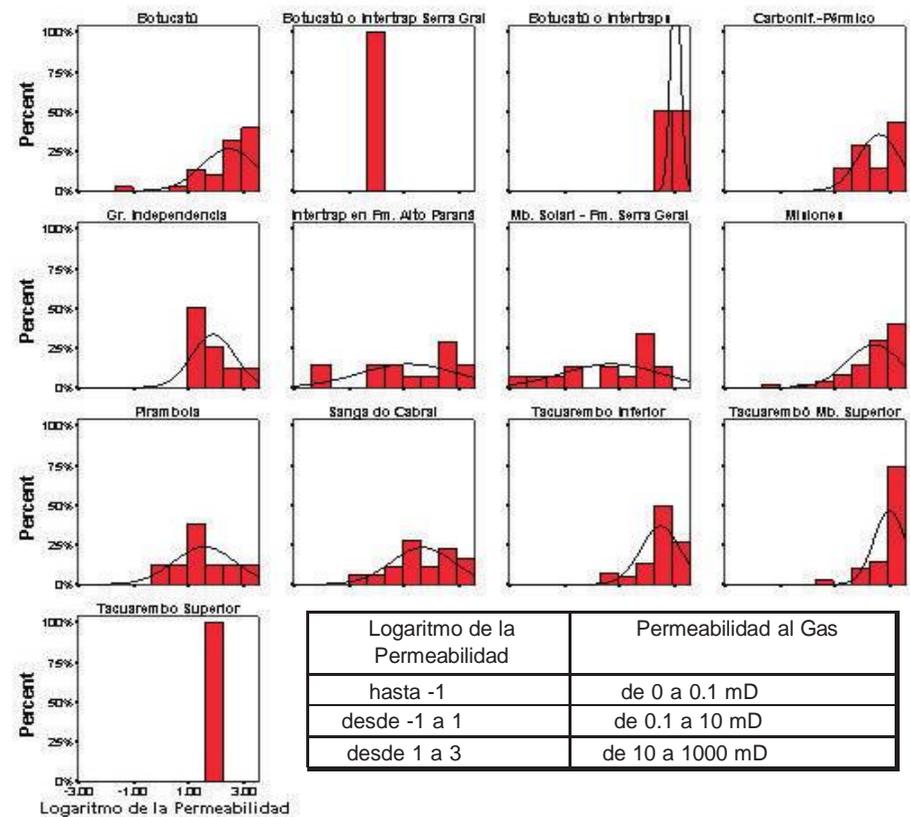


Fig. 9 RESUMEN ESTADÍSTICO DE PERMEABILIDADES POR FORMACION
lato sensu Aguirre, Blanco Ibáñez et. al. (2008)

Los autores Aguirre, Blanco Ibáñez et. al. (2008) en su informe han graficado una estadística de los valores de porosidad y permeabilidad de cada unidad formacional Fig. 8 y 9. Se puede ver que para la F. Botucatú (Tacuarembó en Uruguay) entre el percentil 25 al 50 los valores de porosidad varían de un 25% hasta un 35%, entre el percentil 25 al 50 los valores de permeabilidad varían de 10 mD a 1000 mD.

Se han obtenidos valores de porosidad en F. Botucatú del orden los 35% con permeabilidades de hasta 2698 mD, donde la amplitud en la distribución de estos valores se debe a la distribución del cemento silíceo. Para la muestra Fig. 4, la baja porosidad del Mb. Solari se debe a la presencia de ópalo (cuarzo secundario) relleno de los poros, es decir como cemento.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desde un aspecto sedimentológico tanto el Mb. Solari como F. Botucatú son secciones clásticas cuerpos de areniscas rojizas de granometrías medias a fina; de mineralogía cuarcítica y feldespática en abundancia. Para el caso de F. Botucatú, areniscas rojo-ocre y rojo amarillento claro, de poca matriz y escaso cemento carbonático, los granos son de tamaño medio y están recubiertos por una pátina de óxido de hierro, como hematita. También en el Mb. Solari se detectó la presencia de hierro a través de las trazas de Clorita e Illita. A saber, una reducción de hematita provocaría una liberación de hierro (ferro moscovita), pero en cantidades poco significativa Ebrahimiyekta (2017).

Petrográficamente se puede ver la baja porosidad para Mb. Solari es debida fundamentalmente al contenido de ópalo tapando las conexiones porales, sumado al hecho de que en esta muestra, está interdigitado o Intertraps a la F. Serra Geral, por lo tanto los valores de porosidad y permeabilidad poseen una amplia variación que va desde 9% a 25 % y de 0 mD a 958 mD respectivamente, Fig. 4. Los valores extremos de la amplitud estarían asociados a potencias de los Intertraps de más de 10 m, de acuerdo a Silva Busso (1999) con lo cual le otorgarían cualidades petrofísicas como reservorios.

El Mb. Solari de acuerdo a los estudios de Silva Busso (1999), podría estar conformando "draas" o dunas en el orden de decenas de metros de altura o interdigitado o subyacente a la F. Serra Geral y con vinculación lateral, adquiriendo características estructurales de entrapamiento o confinamiento. Adicionalmente estarían los posibles pliegues antiformes y regionalmente aislados regionalmente que describe Fernández Garrasino (1998) y las estructuras de entrapamiento similares, como facies onduladas de considerable altura como para contener al gas propuestas por Sørensen (2007).

Ambas unidades litostratigráficas de yacencia infrapuestas, eventualmente interdigitada o en Intertraps en el caso del Mb. Solari, a la F. Serra Geral potencialmente poseedora de buenas cualidades como roca sello por sus cualidades petrofísicas.

8. CONCLUSIONES

De acuerdo a los valores de porosidad y permeabilidad considerados para la F. Botucatú, los cuales varían de un 25% hasta un 35% y de 10 mD a 1000 mD respectivamente, confiriéndole buenas características petrofísicas como reservorio. Situación que se repite para el Mb. Solari con valores de porosidad de hasta un 25% y permeabilidad hasta 958 mD.

Estructuralmente tanto F. Botucatú como Mb. Solari tendrían buenas disposiciones de entrapamiento o confinamiento del gas. La primera por la posible existencia de control por fallamientos, diques o filones como posibles estructuras de confinamiento; en el segundo la posibilidad de existencia de dunas y pliegues antiformes de decenas de metros, productos de la inversión tectónica regional.

Se sugiere, continuar con futuras investigaciones profundizando en el área de estudio. Realizar el análisis de variables petrofísicas con datos en profundidad, análisis de núcleo o testigo corona, para disminuir la incertidumbre sobre los resultados.

Por medio del almacenamiento a gran escala de hidrógeno gaseoso en el subsuelo se pretende disminuir las emisiones de CO₂, producto de la generación de energía eléctrica convencional, a la vez de favorecer el incremento de la participación de energía de origen renovable. En concordancia con uno de los mecanismos de acción, generación de energía eléctrica libre de carbón, desarrollado por el programa de la Unión Europea Horizonte 2020 y 2050.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre C., Blanco Ibáñez S., Ferraresi P., Rodríguez Schelotto M. L. (2008), Avances en el Conocimiento del Sistema Acuífero Guaraní, Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní, Tomo 1. GEOLOGÍA Y GEOFÍSICA - VOLUMEN 5.
- Bai, M., Song K., Sun Y., He M., Li Y., Sun J. (2014), An over view of hydrogen underground storage technology and prospects in China, Journal of Petroleum Science and Engineering 124: 132 – 136.
- Carden P. O., Paterson L. (1979), Physical, chemical and energy aspects of underground hydrogen storage, International Association for Hydrogen Energy 4: 559 – 569.
- Carneiro J., Matos C. R., van Gessel S. (2019), Opportunities for large-scale energy storage in geological formations in mainland Portugal, Renewable and Sustainable Energy Reviews 99: 201– 211.
- Custodio E., Llamas M.R. (1983), Hidrología Subterránea. Editorial Omega, Segunda Edición, Tomos I y II. Barcelona, España.
- De Lucia M., Pilzb P., Liebscherb A., Kühna M. (2015), Measurements of H₂ solubility in saline solutions under reservoir conditions: preliminary results from project H₂STORE, Energy Procedia 76:487 –494.
- Ebrahimiyehta A. (2017), Characterization of geochemical interactions and migration of hydrogen in sandstone sedimentary formations: application to geological storage, Thesis Doctor, UNIVERSITÉ D'ORLÉANS.
- Fernández Garrasino C. (1998), Provincia de Entre Ríos, Argentina, Prospección de Hidrocarburos, Almacenaje Subterráneo de Gas Natural, Trabajo Inédito.

- Fernández Garrasino, C. (2008), SAG. Aspectos estratigráficos y tectónicos (II). Organización de los Estados Americanos (OEA), Secretaría General Proyecto Sistema Acuífero Guaraní (SGSAG), Montevideo.
- Flesch S., Pudlo D., Albrecht D., Jacob A., Enzmann F. (2018), Hydrogen underground stored Petrographic and petrophysical variations in reservoir sandstones from laboratory experiments under simulated reservoir conditions, International journal of hydrogen energy 43: 20822 – 20835.
- Foh S., Novil M., Rockar E., Randolph P. (1979), Underground Hydrogen Storage, Final Report, Department of Energy and Environment.
- Henkel, S., Pudlo, D., Gaupp, R. and the H2STORE-Team (2013), Research sites of the H2STORE project and the relevance of lithological variations for hydrogen storage at depths, Energy Procedia 40: 25–33
- HYUNDER (2015), Assessment of the potential, the actors and relevant business cases for large scale and seasonal storage of renewable electricity by hydrogen underground storage in Europe , Final Report Summary.
- Li, D., Beyer C., Bauer S. (2018), A unified phase equilibrium model for hydrogen solubility and solution density, International journal of hydrogen energy 43: 512 – 529.
- Lord A. S., Kobos P. H., Borns D. J. (2014), Geologic storage of hydrogen: Scaling up to meet city transportation demands, International journal of hydrogen energy 39: 15570 – 15582.
- Matos C. R., Carneiroc J. F., Silvad P. P. (2019), Overview of Large-Scale Underground Energy Storage Technologies for Integration of Renewable Energies and Criteria for Reservoir Identification, Journal of Energy Storage 21: 241 – 258.
- Paterson L. (1983), The implications of fingering in underground hydrogen storage, International Association for Hydrogen Energy 8: 53 – 59.
- Perez, A. (2017), Hychico Planta Diadema de hidrógeno, Hidrógeno como vector energético y Almacenamiento de Energías Renovables, Conferencia, Ciudad de Buenos Aires
- Pérez Y. M. (2012), Análisis de ecuaciones relacionadas a la explotación de yacimientos petroleros procesadas en forma línea recta. Universidad Autónoma de México, Tesis Facultad de Ingeniería.
- Pfeiffer, W. T., Bauer S. (2015), Subsurface porous media hydrogen storage - scenario development and simulation, Energy Procedia 76: 565 – 572.
- Pfeiffer, W. T., Beyer C., Bauer S. (2017), Hydrogen storage in a heterogeneous sandstone formation: dimensioning and induced hydraulic effects; Petroleum Geoscience 23: 315 – 326

- Pudlo, D.; Flesch, S.; Albrecht, D.; Reitenbach, V. (2018), The impact of hydrogen on potential underground energy reservoirs, EGU General Assembly, Proceedings from the conference.
- Sam Boggs, Jr. (2009), Petrology of Sedimentary, Second Edition, Published by Cambridge University.
- Silva Busso A. (1999), Contribución al Conocimiento Geológico e Hidrogeológico del Sistema Acuífero Termal de la Cuenca Chacoparanense Oriental Argentina. Tesis Doctoral, Facultad de Cs. Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.
- Silva Busso A., Fernández Garrasino C. (2004), Presencia de las Formaciones Piramboiá y Botucatu (Triásico – Jurásico) en el subsuelo oriental de la provincia de Entre Ríos. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 59: 141-151
- Silva Busso A., Machado P., Cosentino J. (2011), Propuesta de Control de las Estructuras del Subsuelo sobre la Geología Terciario-Cuaternaria y su Relación con la Geomorfología Fluvial en la Provincia de Entre Ríos. Convenio YPF-UTN, Facultad Regional Concordia, Concordia, Entre Ríos, Argentina (Inédito). p: 235.
- Sørensen B. (2007), Geological hydrogen storage, In World Hydrogen Technologies Convention.
- Sylvain J. Pirson (1965), Ingeniería de Yacimientos Petrolíferos, Editorial Omega, Segunda Edición, Barcelona, España.
- Tarkowski R. (2019), Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects, Renewable and Sustainable Energy Reviews 105: 86 –94.

10. ANEXO

PLAN DE TESIS DE LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO ELECTROLÍTICO Y POSIBILIDADES DE ALMACENAMIENTO EN EL SUBSUELO DE LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS

DIRECTOR:

Dr. A. A. SILVA BUSSO

ASPIRANTE:

Ing. VIVIANA A. VENTURINO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL FACULTAD REGIONAL CONCORDIA

RESUMEN

Acordes con los mecanismos de acción para frenar el ascenso gradual de la temperatura global en las próximas décadas estipulados en el acuerdo de París y en donde la reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) desempeña un rol principal dentro de los lineamientos a seguir hacia la descarbonización del ambiente; ya que éstas, representan a los dos tercios de emisiones netas globales provenientes de la generación de energía. La incorporación de energía de origen renovable como la solar y eólica en la matriz energética y la utilización del hidrógeno como combustible libre de emisiones de carbón, son actualmente consideradas como claves, en los procesos de descarbonización de los distintos sectores, tendiendo hacia el objetivo de “emisiones cero” para el año 2050 propuestos por la Unión Europea. Por ende, en este trabajo se propone el estudio de la producción de hidrógeno por electrólisis y la posibilidad de almacenamiento en el subsuelo a gran escala, con la utilización de energía primaria renovable (Green Hydrogen) procedente de generadora hidroeléctrica de la región. Específicamente excedentes hídricos no despachados a la red de energía eléctrica o marginal de bajo costo y a posteriori, ser acumulado para luego ser reconvertidos en electricidad por celdas de combustible hidrógeno y re-despachados a la red en el momento que ésta lo requiera, asegurando la estabilidad del sistema eléctrico y el abastecimiento de la demanda estacional. Para el sistema de almacenamiento propuesto se deberán realizar estudios de correlación de la geología, litología, estratigrafía del subsuelo entrerriano y caracterización de variables petrofísicas primarias y secundarias, como permeabilidad y porosidad, magnitudes que indicarán la aptitud, calidad y capacidad, de las unidades formacionales como reservorio del hidrógeno gaseoso.

PALABRAS CLAVES: hidrógeno electrolítico, electrolizadores, almacenamiento hidrógeno gaseoso, geología regional, unidades formacionales, porosidad y permeabilidad.

MARCO TEÓRICO Y FUNDAMENTACIÓN

Conforme al Acuerdo de París (UNFCCC de 2015) en donde 195 países se comprometen a tomar determinadas acciones para cumplir el objetivo propuesto “mantener el incremento de la temperatura media mundial por debajo de 2 °C” y seguir lineamientos conjuntos para limitar dicho aumento a 1.5 °C, lo cual no puede llevarse a cabo sin la necesidad de una fuerte reestructuración de los sistemas de producción y consumo de energía a escala mundial. Uno de los más importantes gases de efecto invernadero (GEI) causantes del aumento de temperatura global y el más abundante presente en las emisiones netas es el dióxido de carbono (CO₂). Como mecanismos de acciones a seguir para la mitigación del cambio climático, a consecuencia del aumento de la temperatura global, es la disminución de las emisiones de CO₂ ; para lo cual se ha propuesto la incorporación en la matriz energética las fuentes de energía renovables libres de carbono, ya que las emisiones provenientes de la generación de energía (electricidad y calor) vinculadas a la quema del combustible fósil utilizado, representan las dos terceras partes de las emisiones neta a nivel global, según datos de análisis del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) ¹. Lo que significa que la energía es el factor de fundamental importancia dentro de los procesos asociados a la descarbonización de los distintos sectores. Siguiendo la agenda climática global, la Unión Europea (UE) ha fijado objetivos asociados a la energía proponiendo reducción de los niveles de los gases de efecto invernadero hasta un 95% para el año 2050 y actualmente la UE propone objetivos de reducción de emisiones de un 40% , un 27% de energía de fuentes de energía de origen renovable y un 30% en la mejora de la eficiencia energética² para el año 2030.

A nivel mundial se ha visto un marcado crecimiento en la matriz energética de utilización de fuentes de energía de origen renovables, en particular la solar, fotovoltaica y biocombustibles de última generación, lo que ha demostrado una reducción en las emisiones. Pero a pesar del fuerte incremento en las últimas décadas de esta tecnología, no es suficiente para lograr los objetivos acordados, hacen falta más esfuerzos para llevar adelante la requerida transición energética de emisiones cero.

El hidrógeno es un vector energético, un combustible versátil libre de emisiones de carbono y su amplia utilización en distintos sectores como la industria química, transporte y en energía (considerando producción de calor y electricidad), hacen viable su participación dentro del sector eléctrico (generación, transporte y distribución) a través de celdas de combustible, es decir

¹ CO2 Emissions from Fuel Combustion: Overview - IEA. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-from-fuel-combustion-overview>

² The Future of Hydrogen – Analysis - IEA. <http://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

conversión en electricidad o almacenamiento de electricidad, ha generado un nuevo paradigma otorgándole un rol enmarcado en los procesos vinculados a la transición energética. Actualmente el hidrógeno es producido a partir de gas natural y carbón donde las emisiones asociadas son significativas, por ello la producción de hidrógeno limpio con la utilización de energías renovables, concepto de hidrógeno limpio (Green Hydrogen concept), es una tendencia a seguir por varios países a través de diversos proyectos y/o a escala piloto en pos del reemplazo gradual del hidrógeno con bajo contenido de emisiones de carbón utilizado actualmente en todo el mundo. El futuro crecimiento del hidrógeno por electrolisis de agua, tecnología madura a la fecha, para la utilización de energías de origen renovables como energía primaria de generación, dependerá básicamente de bajar algunos costos particulares de fabricación de electrolizadores de gran potencia, la cual se estima en una reducción del 30% para el año 2030. De acuerdo al análisis realizado por la Agencia de Energía Internacional (IEA) donde se proponen dos rutas principales de producción de bajas emisiones de carbono, las cuales implican articular tecnologías convencionales con tecnologías de captura y utilización o almacenamiento de carbono (CCUS) y la otra generar hidrógeno a través de la electrólisis del agua³.

Dentro de este contexto energético se plantea el estudio de la producción de hidrógeno electrolítico con energía marginal del sistema eléctrico o excedentes hídricos estacionales y no despachados al sistema de energía de la red nacional, provenientes de la hidroeléctrica ubicada en nuestra región (Larissa de Souza Noel Simas Barbosa et al. 2016). Esta fuente primaria renovables es de carácter estacional, es decir, intermitente lo que significa que el electrolizador deberá ser seleccionado para trabajar a potencia variable. Adicionalmente, se plantea el estudio de la posibilidad de almacenamiento de hidrógeno gaseoso a gran escala (Heinemann et al., 2018), en este caso, en el subsuelo de la provincia de Entre Ríos para su posterior utilización como, por ejemplo, reconvertido en electricidad por medio de celdas de combustibles (Fuel Cell) e inyectado al sistema eléctrico interconectado nacional.

Se pretende obtener de este estudio un aporte al conocimiento técnico-científico dentro del área de estudio para una implementación a futuro de esta tecnología; ya que producir hidrógeno libre de carbono y almacenarlo en grandes cantidades, no solo favorecería técnicamente al sistema eléctrico al convertirse en activos como reserva de energía (back Up) a la vez de formar parte del sistema de regulación eléctrico, sino que también podría llegar a cubrir los picos de demanda que la generación estacional no puede abastecer (Smolinka et. al., 2015) (Barton et. al. 2010); y eventualmente abastecer flotas de vehículos a hidrógeno de emisiones-cero u otros usos a escala local y/o regional. La utilización de estas tecnologías tendría un impacto socio-económico regional al generar nuevas fuentes de trabajo y formación de recursos humanos, contribuir en las acciones de mitigación de los efectos del cambio climático por medio de los mecanismos de reducción de emisiones de CO₂ (Rahil et al., 2019).

³Hydrogen – Analysis - IEA. <https://www.iea.org/reports/hydrogen>

ESTADO DEL ARTE

En la última década, los avances en la industria de la manufactura de generadores de hidrógeno por electrólisis de agua⁴, particularmente electrolizadores alcalinos de baja presión han evolucionado fuertemente desde (Cruden A. et. al., 2013), tanto en lo que se refiere a nuevos tratamientos superficiales de los electrodos (Ganci et al., 2018) como nueva configuración (Kuleshov et. al., 2016) y conexionado de las celdas del stack. El sistema interno de recirculación del electrolito, implica moderación de las reacciones y facilita la transferencia de masa; estas a su vez, permiten que el equipo pueda trabajar de manera estable, disminuyendo los sobrepotenciales de los electrodos. Incrementados también por resistencia superficial, además las presiones diferenciales en el diafragma, que disminuyen la vida útil y comprometen la pureza del hidrógeno por presencia de oxígeno en niveles no aceptados. De esta manera, se ha logrado mantener controlado y seguro el proceso con presiones y temperaturas estables y no perjudiciales para la vida útil del electrolizador. Antes de estos avances, éstos podían operar dentro de un rango entre el 16% (mínimo técnico) y 100% de potencia nominal, es decir, a potencia constante, ya que la electrólisis se realiza en forma directa y de rampa igual al incremento de la potencia de alimentación (Ursúa et. al., 2009); es decir, sigue la curva de carga; por lo que una rampa escarpada comprometería fuertemente a la estabilidad del sistema y sin dejar de lado la parte de seguridad, ya que podían formarse mezclas peligrosas explosivas (mixing). Por estas razones, era inviable técnicamente la operación a potencia variable. Actualmente existe la tecnología que podría facilitar el uso de energía renovables primarias directamente acopladas al electrolizador⁵, como sería en el caso de nuestra región, excedentes hídricos estacionales (energía variable) no despachados a la red eléctrica o marginal de bajo costo.

La producción de hidrógeno por electrólisis de agua propuesta en los párrafos anteriores, conlleva a suponer la posibilidad de almacenamiento de hidrógeno gaseoso a gran escala (Heinemann et al., 2018) en el subsuelo regional.

A escala global el almacenamiento subterráneo de gas ha sido ampliamente explotado durante décadas, tanto para el gas natural como para el gas de ciudad o biogás, el cual contiene en fracción 60% de hidrógeno (H₂) y 40% de metano (CH₄) entre otros gases. En Francia, por ejemplo, el acuífero de Beynes conformado por arenisca no consolidada se ha operado satisfactoriamente por más de 30 años con biogás, proveniente de los reactores de residuos sólidos urbanos y la operación de los pozos se realiza anualmente para cubrir la demanda de invierno, ciclos operativos técnico-económico posibles para el caso de acuíferos. Además, el almacenamiento de hidrógeno en el subsuelo no representa un peligro potencial para el medio ambiente, ni sistemas acuáticos o terrestres (Fho et. al., 1979).

En el proyecto de la UE (HyUnder 2015), el cual tiene como objetivo el establecer la viabilidad de unidades formacionales como reservorios de hidrógeno gaseoso en Francia, España, Alemania, Rumania, Holanda e Inglaterra y establecer las ventajas y oportunidades para distintos sectores de

⁴ "Electrolysis | Hydrogenics." <https://www.hydrogenics.com/technology-resources/hydrogen-technology/electrolysis/>.

⁵ "Enertrag AG." <https://enertrag.com/portal-fuer-alle-erneuerbare-energie-loesungen>.

la economía para el almacenamiento de hidrógeno. En Argentina y en colaboración con el proyecto antes mencionado, se encuentra Hychico- Planta de Hidrógeno Diadema en Comodoro Rivadavia, provincia de Chubut. Ciudad en la cual se ha realizado el almacenamiento de hidrógeno gaseoso en pozos agotados de gas natural (Pérez et. al. 2017). En este caso, el gas (CH_4) inextraíble del pozo se utiliza como gas colchón o de base, el cual está encargado de mantener estable las presiones durante los regímenes de inyección / extracción de la mezcla de gases, es decir durante la operación del yacimiento. Al ser el gas de base existente al igual que la infraestructura de perforación y sus instalaciones asociadas, convierte a este sistema en el más viable a nivel técnico-económico con respecto a los demás sistemas de almacenamiento subterráneos según los estudios económicos de (Lord et. al. 2014). Otro proyecto de la UE a considerar es el H2STORE, que investiga las variables petrofísicas, geofísicas y geoquímicas, mineralógicas, microbianas y la interacción o variación de éstas por la presencia de gas hidrógeno, particularmente en la superficie poral recubiertas por arcillas que eventualmente serán modificadas cambiando los cementos (Henkel et. al., 2013). El estudio de viabilidad realizado en Portugal donde se evaluó las diferentes tecnologías de almacenamiento en el subsuelo, como ser en depósitos de sal, en pozos agotados y en acuíferos salinos; para este último, los resultados fueron satisfactorios para la posible implementación según (Carneiro et. al., 2019).

Las posibles reacciones químicas serían con el óxido férrico Fe_2O_3 (hematita) presente en la formación, convirtiéndose en óxido ferroso Fe_3O_4 más agua con un necesario incremento en la temperatura del reservorio o catálisis (Fho et. al., 1979). Pero estudios realizados en Francia sobre la Formación Voges del triásico inferior, rocas sedimentarias (areniscas) ricas en cuarzos y feldspatos, se demostró a través de ensayos de laboratorio con núcleos de la formación, que después de un año de exposición en condiciones de reservorio, que solo se produjo una mínima reducción en la hematita con la consecuente liberación de hierro (ferromoscovita), con lo cual se expuso que el almacenamiento de hidrógeno en el subsuelo no representa un peligro potencial para el medio ambiente, ni sistemas acuáticos o terrestres en evidencia que no hubo alteración significativa de las características petrográficas de porosidad y permeabilidad (Ebrahimiyehta A. 2017).

Aún hoy existen restricciones respecto a este sistema de almacenamiento, como por ejemplo los relacionados con la migración del gas a través de la roca sello, sobre el sistema de perforación y las fugas potenciales a través de fracturas no detectadas. Otro aspecto a considerar es el de reacciones bioquímicas y reacciones con otros minerales presentes en la formación, aunque ya se ha manifestado en forma empírica que estas reacciones son mínimas. Pero, aun así se debe profundizar en la caracterización del acuífero, sobre todo sus propiedades petrofísicas, hidrodinámica y geometría (Tarkowski 2019).

OBJETIVOS

Se plantean a saber:

PRINCIPALES

1. Identificar la capacidad de generación de hidrógeno electrolítico.
2. Identificar a las Formaciones geológicas regionales como posibles reservorios de gas H₂.

SECUNDARIOS:

1. Elección del generador de hidrógeno para operación a potencia variable e intermitente.

METODOLOGÍA

Para la concreción de los objetivos propuestos tanto los primarios como el secundario, se deberán realizar diferentes tareas secuenciales. Las mismas se basarán en la exploración bibliográfica, recopilación y análisis de datos históricos contenidos en los informes anuales elaborados por la Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico (CAMMESA) para el caso de los excedentes de energía, hídricos no despachados a la red por la generadora hidroeléctrica de Salto Grande. Para la concreción del segundo objetivo se deberán realizar, en base a datos regionales disponibles, estudios de correlación de la geología, litología, estratigrafía del subsuelo entrerriano (Silva Busso A. 1999) y la caracterización de variables petrofísicas primarias y secundarias, como permeabilidad y porosidad, se realizarán a través del análisis de datos de los registros de pozos existentes del sistema acuífero guaraní.

Descripción de tareas:

- Análisis y cuantificación de la energía marginal estacional puesta a disposición
- Estimación de la capacidad de generación de hidrógeno
- Búsqueda de la tecnología de hidrógeno adecuada (electrolizador)
- Análisis de la geología regional.
- Geoquímica de las rocas sedimentarias.
- Estudio de la litología, estratigrafía, hidrogeología, hidroquímica
- Petrofísica de Formaciones geológicas en el sistema acuífero guaraní (SAG)
- Análisis de registros de pozos-Perfilaje de pozos.

BIBLIOGRAFÍA

Barton John, and Rupert Gammon (2010), The Production of Hydrogen Fuel from Renewable Sources and Its Role in Grid Operations, Journal of Power Sources 195, no. 24

Carneiro J., Matos C. R., van Gessel S. (2019), Opportunities for large-scale energy storage in geological formations in mainland Portugal, Renewable and Sustainable Energy Reviews 99: 201–211.

Crotogino, F. (n.d.). Chapter 20 - Larger Scale Hydrogen Storage. *Storing Energy*, 411–429.

Cruden Andrew, David Infield, Mahdi Kiaee, Tamunosaki G. Douglas, and Amitava Roy (2013), Development of New Materials for Alkaline Electrolysers and Investigation of the Potential Electrolysis Impact on the Electrical Grid, *Renewable Energy* 49: 53–57.

Ebrahimiyehta A. (2017), Characterization of geochemical interactions and migration of hydrogen in sandstone sedimentary formations: application to geological storage, Thesis Doctor, UNIVERSITÉ D'ORLÉANS.

Foh S., Novil M., Rockar E., Randolph P. (1979), Underground Hydrogen Storage, Final Report, Department of Energy and Environment.

Ganci, F., Lombardo, S., Sunseri, C., & Inguanta, R. (2018). Nanostructured electrodes for hydrogen production in alkaline electrolyzer. In *Renewable Energy* (Vol. 123, pp. 117–124). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.033>

Heinemann, N., Booth, M. G., Haszeldine, R. S., Wilkinson, M., Scafidi, J., & Edlmann, K. (2018). Hydrogen storage in porous geological formations – onshore play opportunities in the midland valley (Scotland, UK). *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(45), 20861–20874.

Henkel, S., Pudlo, D., Gaupp, R. and the H2STORE-Team (2013), Research sites of the H2STORE project and the relevance of lithological variations for hydrogen storage at depths, *Energy Procedia* 40: 25–33

HYUNDER (2015), Assessment of the potential, the actors and relevant business cases for large scale and seasonal storage of renewable electricity by hydrogen underground storage in Europe, Final Report Summary.

Kuleshov, V.N., N.V. Kuleshov, S.A. Grigoriev, E.Y. Udris, P. Millet, and A.S. Grigoriev (2016), Development and Characterization of New Nickel Coatings for Application in Alkaline Water Electrolysis, *International Journal of Hydrogen Energy* 41, no. 1: 36–45.

Larissa de Souza Noel Simas Barbosa, Javier Farfan Orozco, Dmitrii Bogdanov, Pasi Vainikka, Christian Breyer (2016), Hydropower and power-to-gas storage options: The Brazilian energy system case, *Energy Procedia* 99: 89 – 107.

Lord A. S., Kobos P. H., Borns D. J. (2014), Geologic storage of hydrogen: Scaling up to meet city transportation demands, *International journal of hydrogen energy* 39: 15570 – 15582.

Perez, A. (2017), Hychico Planta Diadema de hidrógeno, Hidrógeno como vector energético y Almacenamiento de Energías Renovables, Conferencia, Ciudad de Buenos Aires

Rahil, A., Gammon, R., Brown, N., Udie, J., & Mazhar, M. U. (2019). Potential economic benefits of carbon dioxide (CO₂) reduction due to renewable energy and electrolytic hydrogen fuel deployment

under current and long term forecasting of the Social Carbon Cost (SCC). *Energy Reports*, 5, 602–618.

Silva Busso A. (1999), *Contribución al Conocimiento Geológico e Hidrogeológico del Sistema Acuífero Termal de la Cuenca Chacoparanense Oriental Argentina*. Tesis Doctoral, Facultad de Cs. Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.

Smolinka, Tom, Emile Tabu Ojong, and Jürgen Garche (2015), *Hydrogen Production from Renewable Energies—Electrolyzer Technologies, Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*, 103–28.

Tarkowski R. (2019), *Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 105: 86 –94.

Ursúa Alfredo, Luis Marroyo, Eugenio Gubía, Luis M. Gandía, Pedro M. Diéguez and Pablo Sanchis (2009), *Influence of the Power Supply on the Energy Efficiency of an Alkaline Water Electrolyser*, *International Journal of Hydrogen Energy* 34, no. 8: 3221–33.