

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CUANTIFICACIÓN DEL POTENCIAL
GEOTÉRMICO USANDO LOS POZOS
EXPLORATORIOS DE OIL AND GAS
EXISTENTES, OESTE DE DALLAS,
TEXAS, ESTADOS UNIDOS.**

TESINA

Que para obtener el título de

**ESPECIALISTA EN EXPLORACIÓN Y
APROVECHAMIENTO DE
RECURSOS GEOTÉRMICOS**

P R E S E N T A (N)

MARISA NOEMI FRANCIOSI RAMIREZ

DIRECTOR(A) DE TESINA

DRA. ROSA MARIA PROL LEDESMA



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mi querida hermana Mónica, donde te encuentres, bañada de mar....

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, aprovecho para agradecer a mi Tutora, la Dra. Rosa María Prol por su paciencia, conocimientos compartidos y buena disposición, ayudando a que la presente tesina se desarrolle en el mejor ambiente de cordialidad, profesionalismo y confianza.

Además, quisiera agradecer a mis compañeros de curso por todo el apoyo, risas, preocupaciones y alientos compartidos que, sin ellos, no hubiera sido posible transitar este tiempo.

Expreso también mi gratitud hacia los profesores de la Especialidad quienes dieron todo de su parte, transmitiendo y compartiendo valiosos conocimientos, con absoluta dedicación y paciencia.

Deseo también agradecer a mi compañero de la vida, mi esposo Sebastian Villarroel, por toda la paciencia y sacrificio puesto a mi servicio día a día mientras cursaba esta Especialización, ofreciéndome, además de su invaluable tiempo, el apoyo incondicional de siempre y el amor que me ha brindado todos estos años.

Quiero dejar este trabajo a Mi hija, Abril Villarroel, como ejemplo de esfuerzo, para confirmarle que la perseverancia es vital en la vida y da sus frutos y que ella es capaz de alcanzar todo lo que se proponga, pues tiene una gran vida por delante, solo debe confiar en ella misma.

Por último, quisiera dedicarle la presente tesina a mis padres quienes siempre han tenido una confianza ciega en mis capacidades y hacia mi persona, siendo mis guías para querer superarme y ser mejor profesional, pero, por encima de todo, mejor persona.

Finalmente, agradecer a Dios por guiarme, fortalecerme y darme alivio en momentos personales, muy difíciles, transcurridos durante el cursado de esta Especialización y también por haberme entregado a una hermosa familia y conocer a gente tan maravillosa en este proceso tan importante en mi vida.

RESUMEN

El estado de Texas presenta un entorno único para el desarrollo de energía geotérmica debido al predominio de temperatura moderada, cuencas sedimentarias profundas, una infraestructura preinstalada asociada con operaciones de petróleo y gas heredadas y en curso y el conocimiento de yacimientos existentes. En Texas se ha informado de temperaturas de fondo de pozo del subsuelo de más de 240 °C (460 °F). Muchos de los campos y reservorios dentro de estas cuencas ahora están maduros o están llegando al final de su vida productiva y presentan una oportunidad, para que estas formaciones profundas pasen de la producción de petróleo al aprovechamiento de la energía geotérmica para la producción de electricidad, utilizando la infraestructura existente y el legado de información geológica creada por la industria del petróleo y el gas.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) conforman uno de los métodos más eficientes de representación y manejo de datos/informaciones espaciales. La utilización de los SIG en las geociencias ha permitido gestión de datos y mapeo para la prospección y desarrollo de los recursos geotérmicos. En el presente trabajo se utilizaron los Sistemas de Información Geográfica para la identificación de campos geotérmicos, ya que constituyen una herramienta de detección temprana para la de toma de decisiones usando la asociación espacial de datos de interés geotérmico. Así, en este trabajo, el uso de los SIG junto con datos recolectados de pozos petroleros del área de *Dallas-Fort Worth* han permitido la selección de las mejores áreas donde existen pozos factibles para su aprovechamiento geotérmico, utilizando modelos basados en el Método Booleano para la selección de los sitios de interés en el área de estudio.

ABSTRACT

Texas State presents a unique environment for geothermal energy development due to the prevalence of moderate temperatures, deep sedimentary basins, pre-built infrastructure associated with legacy and ongoing oil and gas operations and knowledge of existing reservoirs. Subsurface bottom-hole temperatures in Texas vary around 240 °C (460 °F). Many of the fields and reservoirs within these basins are now mature or nearing the end of their productive lives. They present an opportunity of transitioning from oil production to geothermal energy production using existing infrastructure and the legacy of geological information created by the oil and gas industry.

Geographic Information Systems (GIS) are one of the most efficient methods of representation and management of spatial data/information. The use of GIS in the geosciences leads to data management and mapping for the prospecting and development of geothermal resources. In the present study, Geographic Information Systems were used to identify geothermal fields, since they constitute an early detection tool for decision-making using the spatial association of data of Geothermal interest. In this work, the use of GIS associated with the data collected from oil wells in the Dallas-Fort Worth area led to select the best areas where feasible wells for geothermal exploitation can be found, using models based on the Boolean Method for the selection of the sites of interest in the study area.

Tabla de contenido

AGRADECIMIENTOS	4
RESUMEN	5
ABSTRACT	5
Tabla de contenido	6
1- INTRODUCCIÓN	7
1.a JUSTIFICACION	7
2- OBJETIVOS	9
2.a OBJETIVO PRINCIPAL	9
2.b OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
3- ANTECEDENTES	10
3.a- Acerca de la Utilización de recursos geotérmicos	11
• Producción eléctrica	12
• Usos directos	16
4- ÁREA DE ESTUDIO	18
4.a – Localización	18
4.b - Entorno Geológico	20
5- MATERIALES Y MÉTODOS	24
5.a Bases de Datos	24
5.a.1 Tratamiento Adicional de los datos	29
5.b Interpolación IDW y Operación entre capas Ráster	32
5.c- Modelo Booleano	33
6- RESULTADOS	37
6.1- Mapas interpolados por el método IDW y mapa producto de la resta entre capas ráster	38
6.2- Mapas binarios resultantes (capa de evidencia) de la reclasificación de los mapas interpolados con sus operadores condicionales correspondientes según la Tabla 4.	44
6.3- Mapa Resultado:	48
7- DISCUSIÓN	48
8- CONCLUSIONES	54
BIBLIOGRAFÍA	55

1- INTRODUCCIÓN

1.a JUSTIFICACIÓN

Esta más que demostrado que Texas, además de ser gran productor de energía, debido a la abundancia de petróleo y gas, es un estado muy rico y autosuficiente en energías limpias. El avance de diferentes recursos, además del relacionado al petrolero, permiten ampliar la matriz energética de Texas, quedando la energía geotérmica como una de las más importantes a considerar. Un hecho no menor es la cantidad de pozos perforados con fines petroleros que son altamente aprovechables para desarrollar energía geotérmica.

Texas es el principal productor de petróleo y gas en EUA con más de 216,000 pozos de petróleo y gas activos en todo el estado. Junto con estos se encuentran los pozos de inyección y eliminación que devuelven el agua producida y los fluidos de fracturación de estos pozos de petróleo y gas. Texas tiene más de 50,000 pozos de inyección (Bhattacharya et. al., 2022)

En los últimos años la población de Texas ha crecido a tasas de entre el 15 a 20 % y, bajo la urgencia de una transición energética planteada por el actual gobierno, se hace cada vez mayor la necesidad de creación de nuevas fuentes de energía tal como lo demuestra el Proyecto Texas 2023 (Diamon et.al. 2021) el cual considera la necesidad de *expansión de la energía*, implementando una estrategia energética. De hecho, desde el 2007, Texas ha sufrido apagones continuos debido a la imposibilidad de abastecer debidamente a la población con energía eléctrica. (Matt Egan, CNN en español, 2021)

La falta de energía eléctrica es solamente la punta del iceberg. La calidad del aire en las ciudades y el daño que los combustibles fósiles le están haciendo a nuestro medioambiente no pasa desapercibido.

Pensar en el desarrollo de centrales eléctricas de energía geotérmica, como energía renovable de carga base adicional, puede ayudar a satisfacer estas demandas de energía cada vez mayores.

La energía geotérmica es un recurso renovable con una capacidad constante para competir con las plantas de energía nuclear, de gas natural y de carbón. Otras ventajas es que, además de ser escalable, permite ser configurada como fuente de energía distribuida o centralizada, haciéndola local y capaz de instalarse dentro o cerca de los centros poblados. (Wang et.al., 2016)

Las áreas de Texas más estudiadas, en relación con el aprovechamiento del potencial geotérmico, son las áreas activas de producción de hidrocarburos en el Este y Sur del estado. Estas se localizan cercanas a las grandes áreas urbanas de *Dallas-Fort Worth, Houston, San Antonio y Corpus Christi*. La mayoría de los campos de petróleo y gas, en estas regiones están conectados a la red eléctrica con las principales líneas de transmisión existentes, a menudo, directamente sobre el nodo troncal, lo que permite conexiones convenientes a la red para el desarrollo de energía geotérmica utilizando el sistema de línea eléctrica existente.

El presente trabajo se enfoca en un sector al Oeste de *Dallas-Fort Worth* donde la evaluación del potencial geotérmico está poco desarrollada, pero donde se cuenta con muchísima información de más de 3323 pozos abandonados y en producción, permitiendo el mapeo de temperatura de pozos con profundidades de más de 2200 m, con condiciones de descarga de calor favorable, capaces de generar electricidad.

El sector seleccionado en este trabajo coincide con la ubicación de los campos de petróleo y gas existentes y con áreas de gradiente de calor anómalos, como se muestra en el Mapa de gradiente geotérmico del estado de Texas. (Figura 1)

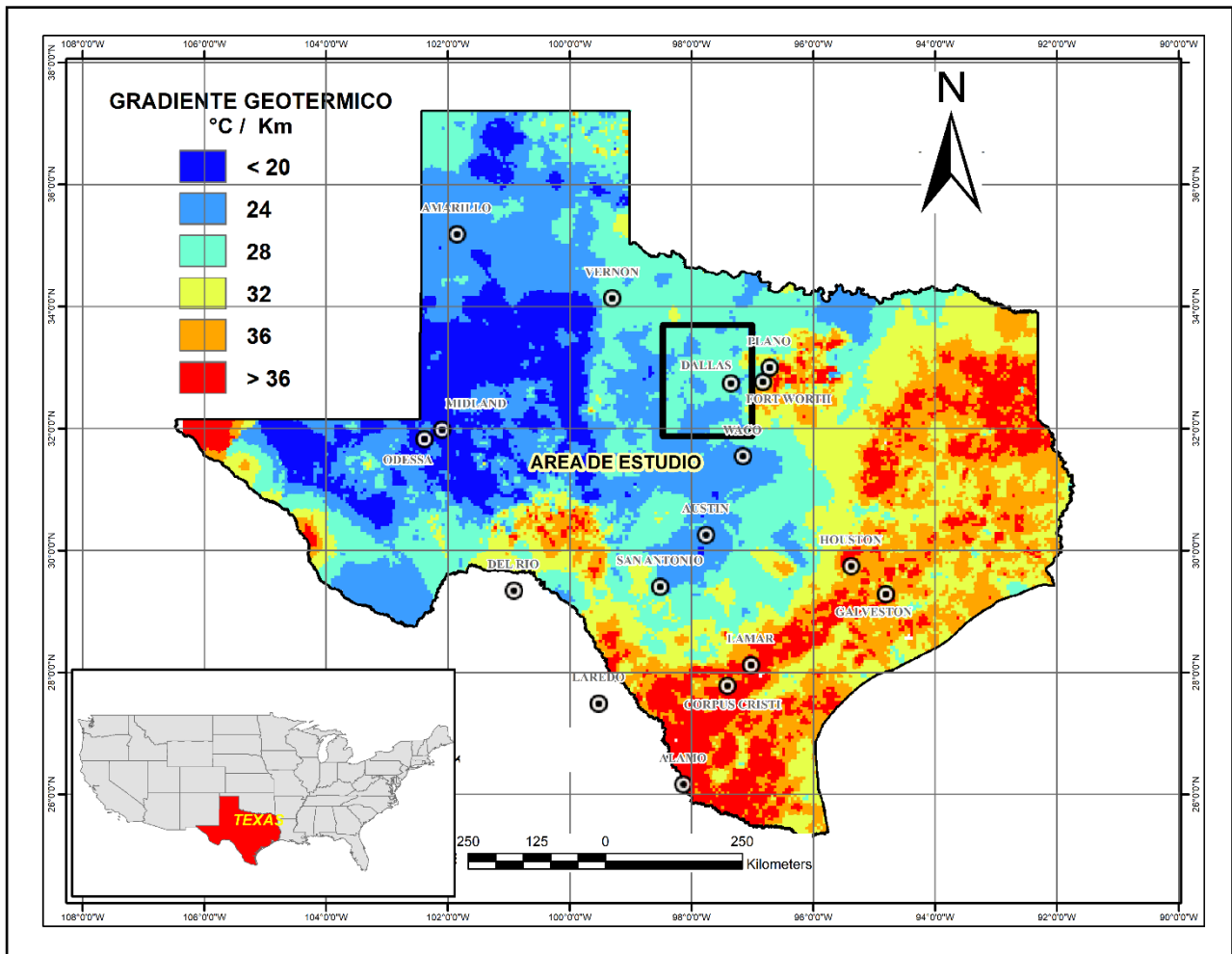


Figura 1: Mapa de Gradiente Geotérmico de Texas y Área de Estudio indicada con el recuadro negro. (Zafar y Cutright, 2014)

La evaluación de los datos de temperatura existentes y nuevos, junto con los cambios en la tecnología geotérmica, la posibilidad del desarrollo de energía limpia con capacidad de producción 24/7, sumado a la necesidad de una transición energética, impulsa aún más las razones indiscutibles que tiene Texas para desarrollar su potencial geotérmico.

Con respecto a la utilización de los recursos geotérmicos en este sector de Texas, se centró en aquellos de temperatura baja a moderada, accesibles a través de profundidades típicamente asociadas con pozos de hidrocarburos. Las ventajas de usar pozos/campos de petróleo y gas son:

1) La industria geotérmica y de petróleo y gas tienen bases de conocimiento superpuestas que pueden aprovecharse para mejorar ambas industrias;

- 2) Los datos de campos petroleros existentes son accesibles para la revisión y comprensión inicial del yacimiento, lo que reduce los costos de exploración en comparación con los sistemas geotérmicos convencionales;
- 3) Los campos de petróleo y gas cuentan con la infraestructura existente necesaria para el desarrollo del proyecto geotérmico, es decir, caminos, permisos, plataformas de pozos, conexiones eléctricas a la red, etc.;
- 4) Reducción de costo de capital y riesgo de inversión además de un aumento de ganancias en caso de explotación simultánea de hidrocarburos y geotermia. Se pueden diferir los costos de desmantelamiento y abandono de campos.
- 5) En pozos activos el recurso geotérmico es un sub-producto de la producción petrolera, es de muy bajo costo ya que la mayor parte de los gastos lo paga la producción de hidrocarburos.
- 6) Los nuevos diseños de plantas binarias para la producción de energía y su distribución los hace más fáciles de conectar y usar con pozos de petróleo/gas;
- 7) Los campos de petróleo y gas normalmente están en un estado de flujo con pozos que se interconectan creando nuevas oportunidades para la producción geotérmica. Hay diferentes escenarios que se pueden utilizar para desarrollar los recursos geotérmicos que existen en Texas, desde la producción de electricidad hasta el uso directo del calor.

2- OBJETIVOS

2.a OBJETIVO PRINCIPAL

Este trabajo tiene por objetivo delimitar zonas favorables para la evaluación y estimación del potencial geotérmico en el sector de *Dallas-Fort Worth, Texas*. Para tal fin se realizará el análisis de datos provenientes de perforaciones exploratorias y de producción de petróleo y gas (abandonados o en funcionamiento) con potencial para ser reutilizados para la explotación de energía geotérmica, empleando como herramienta los Sistemas de Información Geográfica.

2.b OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A- Representar geográficamente datos relacionados a variables geotérmicas del área de estudio.

Se trata de representar los datos georreferenciados existentes, que se encuentran en formato de bases de datos (.csv, .xls, .dbf), en distintos mapas, de acuerdo a la variable que se necesite representar. Estas variables permitirán identificar visualmente áreas geotérmicas útiles que, al superponerlas, generan sectores con nueva información, aportando una guía de los pasos a seguir en pro de alcanzar las metas que se persiguen en el presente estudio. A este respecto se elaboraron los siguientes mapas:

- 1- Mapa de Caudal Volumétrico de Producción de Agua
- 2- Mapa de Espesor del Intervalo Productor de Agua
- 3- Mapa de Flujo de calor
- 4- Mapa de Profundidad de Base de Intervalo Productor de Agua

- 5- Mapa de Profundidad donde el Gradiente Geotérmico alcanza los 70 °C.
- 6- Mapa de Profundidad calculado de la diferencia entre la Base del Intervalo de Producción de Agua y la Profundidad donde el Gradiente Geotérmico alcanza los 70 °C.
- 7- Mapa de Temperatura del Agua en el intervalo Productor de Agua.

B- Aplicar el Análisis Multicriterio Utilizando el Método Booleano

- 8- Generación de Mapa de Áreas de Mayor Favorabilidad orientado a encontrar, mediante clasificaciones, las áreas que cumplen con ciertos criterios que, al superponerlas, nos indican sectores con características propicias para analizar con detalle las características de los pozos que allí se localizan para determinar la favorabilidad de aprovechar el recurso geotérmico.

C- Generar un Mapa que muestra cuáles pozos poseen potencial de ser aprovechados para la producción de energía geotérmica

- 9- Elaboración de mapa de favorabilidad para aprovechamiento de energía geotérmica. Basados en los resultados del Mapa de áreas de mayor favorabilidad se podrá seleccionar los pozos dentro de esas áreas que podrían ser reutilizados para la producción de energía geotérmica

3- ANTECEDENTES

En este estudio utilizamos parámetros asociados a los pozos junto con propiedades geológicas y geotérmicas (por ejemplo, existencia de acuíferos, temperatura (gradiente geotérmico), BHT (*Bore hole Temperature*), caudal de agua en producción, profundidad alcanzada, años de perforación). Se propone una investigación caso por caso para una muestra de pozos de alto potencial para garantizar que se cumplan todas las condiciones apropiadas para estimar el potencial de aprovechamiento de recursos geotérmicos para explotación o para usos directos.

Al aplicar las herramientas SIG, el modelo conceptual juega un papel importante en la elección de las capas que estarán involucradas en la elaboración de un mapa de favorabilidad, así como para calificar y ponderar las capas seleccionadas (Moghaddam, et al., 2014). La puntuación y el peso en cada capa se asignan utilizando *criterios estadísticos o se estiman sobre la base de la opinión de expertos, denominados modelos “basados en datos” o “basados en el conocimiento”, respectivamente*. En el modelo basado en datos, las capas se combinan utilizando enfoques como *la regresión logística o el de pesos de la evidencia*, mientras que los modelos basados en el conocimiento suelen emplear operadores booleanos, superposición de índices (IO) y métodos SIG de lógica difusa (Bonham-Carter et al., 1994).

En la presente tesina se emplea un método basado en el Método Booleano a través de los Sistemas de Información Geográfica (SIG o GIS en inglés) para evaluar el potencial de energía geotérmica de las regiones mediante la integración de diferentes tipos de datos de relevancia en exploración geotérmica.

Este enfoque ha sido utilizado por varios autores, quienes han demostrado su aplicabilidad en campos geotérmicos alrededor del mundo. En algunos casos se han utilizado métodos combinados como demuestran algunos ejemplos.

- En México, las zonas geotérmicas se evaluaron mediante la integración de datos geológicos y geofísicos utilizando un enfoque basado en SIG en el campo geotérmico Los Azufres (Prol-Ledesma 2000) donde se combinaron modelos de esquema Booleano, Superposición de Índices y Modelos de Lógica Difusa (Fuzzy model)
- En Indonesia, se desarrolló un modelo SIG para mapear el potencial de los recursos geotérmicos en Java Occidental (Carranza et al. 2008). En Irán, en los pozos del campo geotérmico de Sabalan, se analizaron los datos de geología, geoquímica y geofísica mediante el método Booleano y el de Superposición de Índices para la selección de las áreas favorables de prospección. (Noorollahi et al. 2007).
- También en Irán (Yousefi et. al. 2009) se construyó un mapa de potencial geotérmico que permitió definir 18 áreas con alto potencial de desarrollo en este mismo campo.
- En Italia, se describió una herramienta de integración de datos que utiliza SIG para construir un mapa de la favorabilidad geotérmica de Sicilia (Trumpy et al. 2015).

Algo a tener en cuenta es que el modelo SIG desarrollado es flexible y puede adaptarse para aceptar cambios futuros integrando nuevos datos geocientíficos a medida que estén disponibles y aplicando reclasificaciones simples para producir un mapa de potencialidad.

En lo que respecta al aprovechamiento de los pozos perforados en el estado de Texas, cabe destacar que La Oficina General de Tierras de Texas (GLO) ha lanzado en el año 2022, una serie de derechos de *leasing* de tierras con sobres de ofertas sellados (*Sealed Bid Lease Sale*) para apoyar el desarrollo de plantas de energía solar, eólica y geotérmica. Estos derechos incluyen seis tramos geotérmicos en el Condado de El Paso, al W del estado de Texas. Esta apertura de licitaciones ha tenido numerosos oferentes y se encuentran ya adjudicadas a distintas empresas del país.

3.a- Acerca de la Utilización de recursos geotérmicos

Existen dos opciones para producir energía geotérmica a partir de pozos de petróleo y gas presentes. Primero, un pozo de hidrocarburos existente podría reutilizarse para producir energía geotérmica únicamente, lo que se conoce como **conversión**. En segundo lugar, un pozo existente podría producir hidrocarburos y calor simultáneamente, lo que se conoce como **coproducción** (Lund & Toth, 2021; Pilko, et al., 2021; Oldenburg, et al., 2019)

El modo de utilización de la energía geotérmica depende en gran medida de la temperatura del recurso. Las temperaturas de los recursos geotérmicos suelen dividirse en tres grupos: **alta** (más de 150 °C), **media** (90-150 °C) y **baja** (menos de 90 °C) ThinkGeoEnergy (2021a)

Para la generación de electricidad a escala comercial, se necesita una temperatura mínima del recurso de aproximadamente 150-180 °C (según la tecnología utilizada), aunque las tecnologías existentes pueden producir electricidad a partir de temperaturas tan bajas como 65-70 °C en aplicaciones a pequeña escala (MEET Horizon 2020). Los recursos geotérmicos de temperatura media se utilizan para diversas aplicaciones, como calefacción y refrigeración de espacios, procesos industriales y aplicaciones agroalimentarias. También es posible el uso de calor y energía combinados para aplicaciones de calefacción y refrigeración, así como para la generación de electricidad. Se pueden usar las bombas de calor geotérmica (GHP) para aumentar el contenido de calor de los recursos de baja temperatura para cumplir con los requisitos de energía para diversas aplicaciones.

Con el fin de maximizar el uso de los recursos geotérmicos, la utilización en cascada (es decir, aplicaciones secuenciales alimentadas por el mismo flujo de fuente de energía, donde el flujo de salida de la primera aplicación, por ejemplo, el agua caliente recolectada después de la generación de electricidad), se utiliza para una segunda aplicación de temperatura más baja, como la calefacción urbana, seguidas de otros usos de temperatura más baja sucesivamente. (IRENA e IGA, 2023)

- **Producción eléctrica**

La energía geotérmica de baja temperatura es un recurso abundante y renovable, pero con limitaciones técnicas y económicas para la generación de electricidad. Para que los recursos geotérmicos sean comercialmente viables, el calor debe extraerse del fluido producido a una tasa sostenible y generar una ganancia razonable. Estas condiciones dependen de la calidad del recurso y los costos de producción: temperatura, profundidad, características del fluido y la capacidad de extraer y luego reinyectar los fluidos (DiPippo R, 1995). Estos factores son una función de la geología, es decir, el tipo de roca, el espesor de la capa, la porosidad, la permeabilidad, la presión y el historial térmico, además de factores económicos locales como el precio de la electricidad y la distancia a la red de transmisión.

Determinar las temperaturas dentro de un reservorio (campo) geotérmico es el primer paso para evaluar el recurso, ya que la temperatura se puede usar para determinar la cantidad de energía almacenada. Usando la temperatura, se hacen estimaciones de cuánto calor está disponible para producir electricidad bajo diferentes escenarios de producción de fluidos. En segundo lugar, se calcula un factor de recuperación para la cantidad de calor disponible para la extracción. El factor de recuperación depende principalmente de la permeabilidad, aunque también influyen otras variables tales como el tipo de fluido (agua o gas) que provoca el flujo desde la formación hacia el pozo, la entrada de agua desde la roca reservorio, la disminución de la presión del yacimiento, la tasa de producción, la cantidad de calor extraído en la superficie, y qué formación se utiliza para la inyección de fluidos. Muchas de estas variables son difíciles de evaluar.

Existe muchos estudios que exploran el amplio espectro de temperaturas y caudal de agua de entrada y que han llevado a un amplio desarrollo de tecnología para su aprovechamiento (inclusive los de baja temperatura) para la producción eléctrica. Es por ello que existen numerosos estudios en donde se han desarrollado plantas para el aprovechamiento de temperaturas más bajas. Se trata del uso de las plantas de energía binaria (entrada de 65-70 a 120 °C).

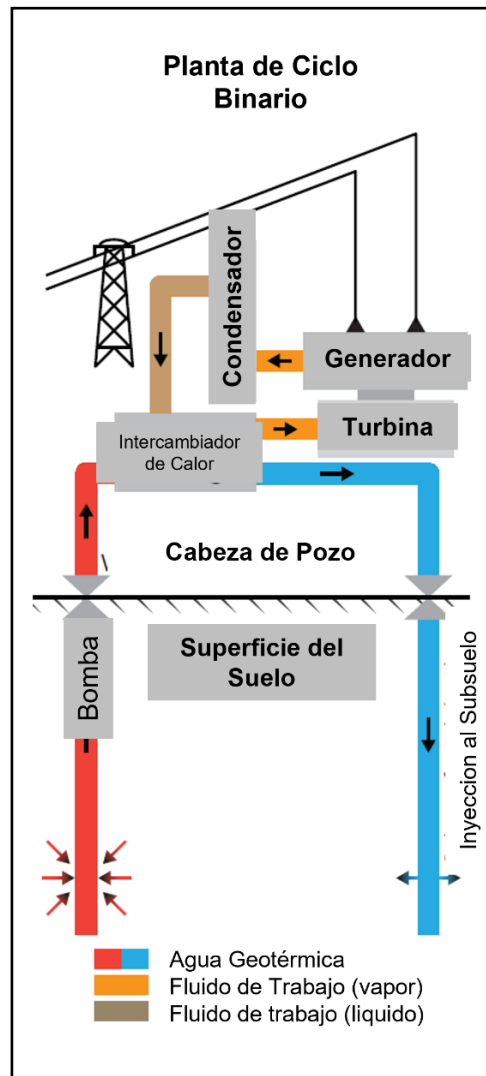


Figura 2: Diagrama esquemático de una planta binaria y sus componentes. Fuente: IRENA, 2023.

Este escenario representa la generación de energía eléctrica utilizando el Ciclo Orgánico de Rankine (ORC) (*Figura 2*).

La electricidad se puede producir utilizando pozos de producción e inyección o utilizando un intercambiador de calor de pozo profundo. La capacidad de energía está determinada principalmente por la tasa de producción, la temperatura del agua producida, la temperatura ambiente, la salinidad del agua, la eficiencia de conversión de la planta de energía geotérmica, la eficiencia de transferencia de calor entre las rocas del yacimiento y el fluido circulante, etc. (Madhawa Hettiarach et. al, 2007).

Existen empresas que, utilizando un ciclo de Rankine orgánico (ORC) junto con tecnologías patentadas (turboexpansores y aircoolers), emplean las fuentes de calor geotérmico y calor residual transformándolas en electricidad, sin emisiones adicionales ni consumo de combustible, todo esto utilizando fuentes de calor de baja temperatura que, anteriormente, se consideraban insuficientes para la generación de energía. Estas unidades son ideales para la producción de electricidad limpia a pequeña y mediana escala.

Un ejemplo de esta tecnología se encuentra en Las Maracas, Casanare, Colombia, destinado a la producción de petróleo por muchos años y donde se ha desarrollado un proyecto piloto de coproducción de petróleo y agua caliente la cual es procesada por una planta binaria *Organic Ranking Cycle* (ORC) produciendo 0.1 MWe, la que es aprovechada para el funcionamiento del campo petrolero (IRENA, 2023). Recientemente se reportó un logro del campo petrolero Blackburn en Nevada, donde se está preparando una pequeña planta binaria (hasta 1 MWe) alimentada con agua coproducida. Otro Ejemplo es Portugal donde los nuevos sistemas modulares de energía eléctrica Climeon se están utilizando en embalses donde las temperaturas están en el rango de 70 °C a 120 °C. (Trota et.al. 2019).

Otras posibles aplicaciones de la coproducción o conversión incluyen 1) usar el agua producida para calentar o edificios frescos cercanos, si esto se considera económico, y 2) gestionar el agua producida en la superficie en su lugar de reinyectarlo en el subsuelo y vender el calor y agua a operaciones agrícolas cercanas, etc. Ambos estos temas requieren una investigación mucho más colaborativa la participación de la industria del petróleo y el gas, el gobierno, la academia, y sociedades profesionales enfocándose en acelerar la innovación multidisciplinar necesaria para hacer coproducciones y conversión de pozos de petróleo y gas existentes a energía geotérmica una realidad económicamente viable. (Livescu, et.al. 2022)

Antes de la implementación del sistema, se debe realizar el análisis químico y el potencial de escala del sistema de tuberías y las tuberías del pozo de reinyección, y también es importante la disponibilidad de los fluidos de enfriamiento (agua) de las unidades a utilizar y los datos de presión del sistema.

Un ejemplo de esta tecnología es la de la empresa *ENOGIA*, un fabricante de ORC basado en turbinas, especializado en la recuperación de calor residual con sistemas que producen de 10 kWe a 180 kWe. (**Figura 3**). Este sistema se adapta a una amplia gama de aplicaciones de recuperación de calor, como calderas de biomasa, motores de gas, *fuentes geotérmicas* o procesos industriales. Cualquier flujo de calor con temperaturas entre 70°C y 120°C se puede recuperar con este sistema gracias a dos turbinas cinéticas. La electricidad producida es monitoreada por relés de protección de desacoplamiento, asegurando su conformidad con la red. El calor restante se puede recuperar para calefacción por suelo radiante o sistema de secado para alcanzar una eficiencia global cercana al 95 %. Sus especificaciones técnicas son:

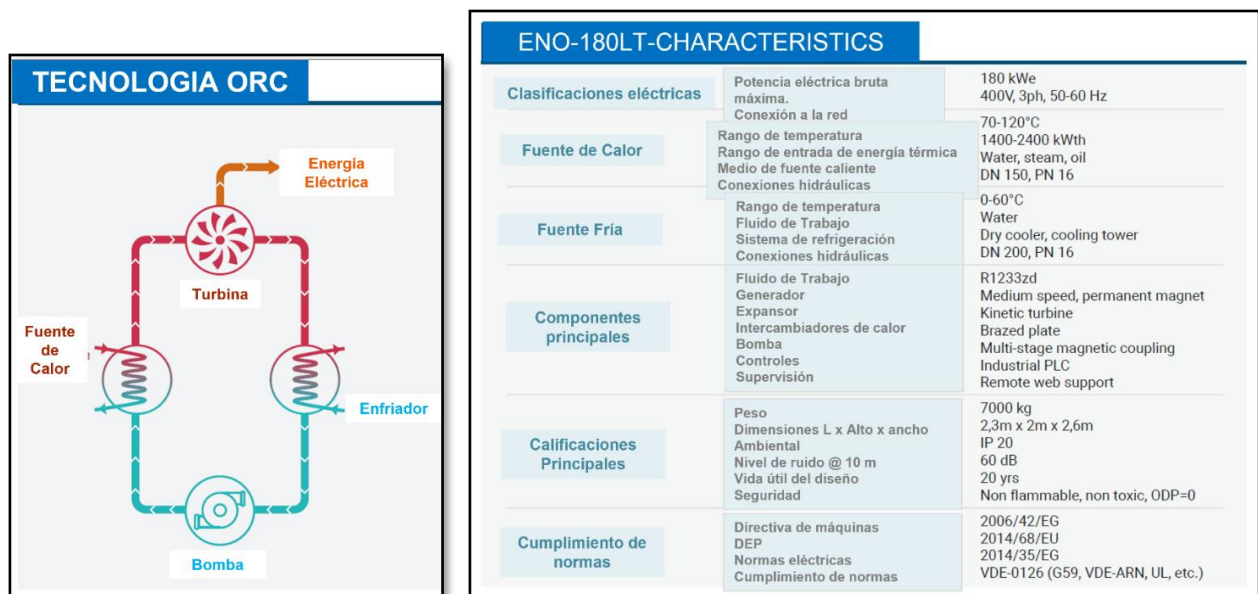



Figura 3: Características técnicas y esquema de funcionamiento de las plantas ORC binarias *ENOGIA*

Otro ejemplo de esta tecnología es la que posee la empresa *ElectraTherm* con su POWER MODULE75 que produce energía libre de combustible y libre de emisiones a partir de varias fuentes de calor residual de bajo grado, utilizando el Ciclo Orgánico de Rankine (ORC) junto con la tecnología patentada de la compañía y la combinación de generador/expansor semi-hermético de doble tornillo BITZER. Este equipo ofrece hasta 75kWe con temperaturas de entrada de 65 a 132°C y rango de caudales que van desde los 3 a 23 l/s. (*Figuras 4 y 5*)

POWER MODULE75 CONFIGURACIONES – HASTA 75 kW_e



POWER MODULE75 Independiente
 // Dimensiones*:Ancho: 72" [1829 mm], Profundidad: 95" [2413 mm], Altura: 85" [2159 mm]// Peso: 5,700 libras. [2591kg]// Balance personalizable de planta// Instalación interior o exterior

POWER MODULE75 con paquete de enfriamiento
 // El paquete de enfriamiento incluye enfriador seco y asociadotuberías/bombas*** Las representaciones pueden no ser una representación exacta

Figura 4: Modulos ORC de la empresa *ElectraTherm*

Param de Entrada de Agua Caliente	Rango de Temp. del Agua de entrada	°F	150 - 270
		[°C]	65 - 132
	Rango de entrada termica	MMBTU/hr	1.024 - 4.268
		[kWth]	300 - 1,250
Rango de Caudal	gpm	47 - 365	
	[l/s]	3 - 23	
PARAM. DE CONDENSACION DEL AGUA ENFRIADA	Cooling water input temp range	°F	50 - 150
		[°C]	[10 - 65]
	Calor rechazado a agua de refrigeración	MMBTU/hr	1.024 - 4.095
		[kWth]	[300 - 1,200]
Caudal de agua de refrigeración	gpm	95 - 412	
	[l/s]	[6 - 26]	
ENFRIADOR SECO	Enfriador seco para temperatura del aire ambiente	°F	20
		[°C]	[11]
	Calor rechazado al enfriador seco	MMBTU/hr	2.730
[kWth]		[800]	
*Actualmente probado hasta 248 °F [120 °C]			

Figura 5: Características técnicas y esquema de funcionamiento de las plantas ORC binarias *ElectraTherm*

Estas innovaciones pueden resultar fundamentales en los próximos años en Texas, ya que las entidades buscan implementar tecnologías geotérmicas escalables en las cuencas sedimentarias del estado (Ratnakar et al., 2022).

- **Usos directos**

Debido a que muchos de los pozos en Texas se perforan a profundidades donde las temperaturas son inferiores a 200 °F (93.3 °C) la producción de agua geotérmica puede ser considerada para aplicaciones económicas específicas.

Para los campos de petróleo y gas existentes en áreas rurales, se pueden agregar aplicaciones de uso directo en la superficie para aumentar la productividad de todos los recursos. Las aplicaciones de uso directo son comunes en el oeste de los Estados Unidos.

Los sistemas geotérmicos de uso directo utilizan energía geotérmica directamente, a diferencia del uso para impulsar una turbina para generar electricidad. Los sistemas de uso directo pueden ser superficiales o profundos. En los sistemas de "uso directo poco profundo", también denominados sistemas de "fuente terrestre", se utilizan bombas de calor geotérmicas ("*GHP*") para recolectar la temperatura constante del subsuelo poco profundo para una variedad de aplicaciones, que incluyen principalmente calentar o enfriar edificios. (*Figura 6*).

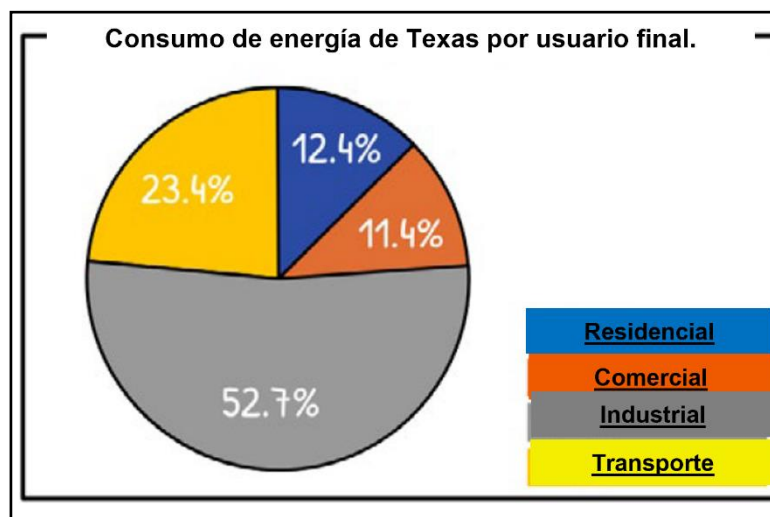


Figura 6: Consumo de energía en 2019 por sector de interés en Texas. Fuente: IRENA-EIA 2022.

En el contexto de "uso directo profundo", se perforan pozos más profundos para alcanzar temperaturas subterráneas más altas, que se pueden utilizar para una variedad de aplicaciones, incluida la calefacción directa industrial y comercial o para alimentar bombas de calor, o para numerosos procesos industriales y de fabricación.

Alrededor de las tres cuartas partes de la energía utilizada en Texas se consume para calentar y enfriar hogares (12.4 %), edificios comerciales (11.4 %) e instalaciones y procesos industriales (52.7 %) (Kapusta et al, 2023). La elevada demanda de energía en este estado hace que, a pesar de ser el mayor productor de

energía limpia en los Estados Unidos, este tipo de energía sólo representa un 26.6% de su demanda total (<https://www.fool.com/research/renewable-energy-by-state/>)

Existe una gran variedad de usos que hace posible la integración de sistemas de conversión de energía más eficientes, como el denominado uso en cascada geotérmica (**Figura 7**). La utilización en cascada utiliza el recurso geotérmico para producir varios productos simultáneamente y es una forma eficiente de aprovechar la energía geotérmica disponible tras haber sido utilizada previamente. Normalmente, tras la producción eléctrica, el fluido aún caliente puede aprovecharse para otros usos con menores requerimientos de temperatura. (Rubio et al., 2015).

Este uso en cascada se logra a través de una planta de poli-generación integrada por tres componentes principales; un ciclo ORC, una máquina de absorción (TAR) y un deshidratador (DEH). La planta se activa mediante un recurso geotérmico a una temperatura indicada.

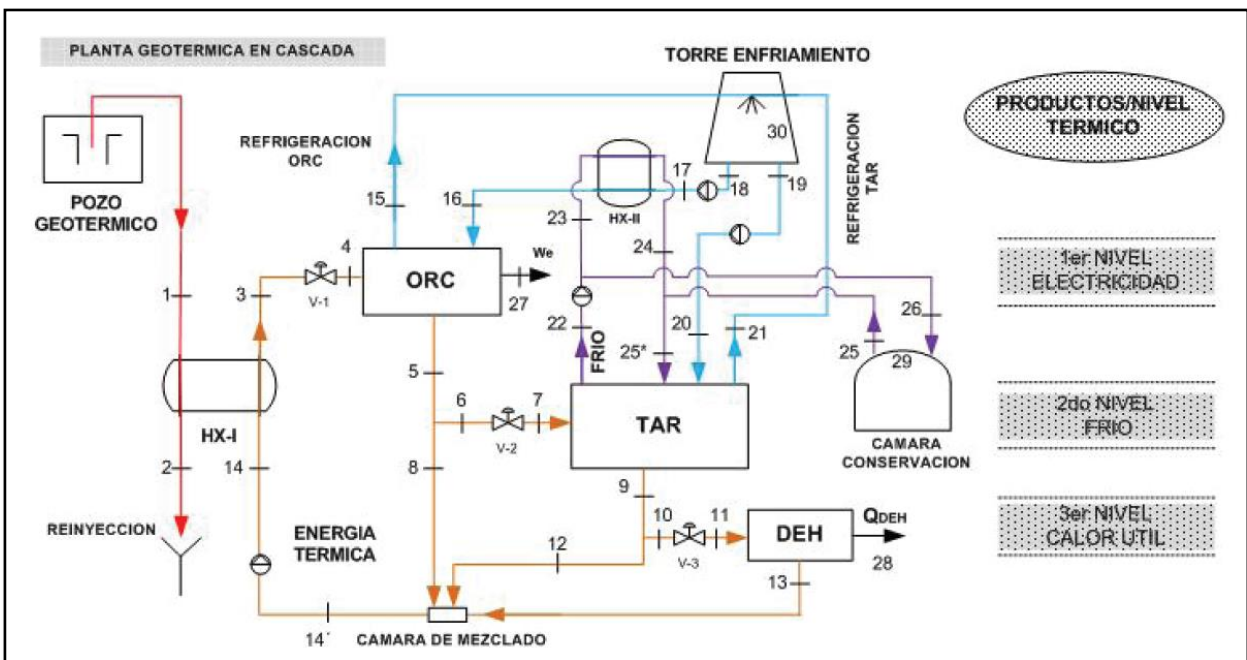


Figura 7: Esquema de funcionamiento de una planta Geotérmica en Cascada y sus componentes. Tomado de Ambriz-Diaz et al., 2019.

Algunos otros usos directos y en cascada destacables son: **Aplicaciones agrícolas y de procesamiento de alimentos:** La energía geotérmica se usa en un rango de temperaturas en diversas aplicaciones agroalimentarias, incluida la producción de alimentos, a través del control de la temperatura de invernaderos para la horticultura, la acuicultura para la piscicultura y la producción de algas, y el calentamiento del suelo (Van Nguyen et al., 2015).

- **La calefacción geotérmica de invernadero:** Requiere temperaturas de 40-100°C.
- **En la acuicultura,** el calor geotérmico se utiliza para calentar el agua, generalmente a 20-30 °C, para garantizar condiciones de crecimiento óptimas para peces y algas.
- **En el procesamiento y almacenamiento de alimentos:** Procesos como el secado de cultivos, la pasteurización, el pelado, el escaldado, el almacenamiento en frío, la refrigeración y la esterilización requieren temperaturas de 60 a >140 °C.

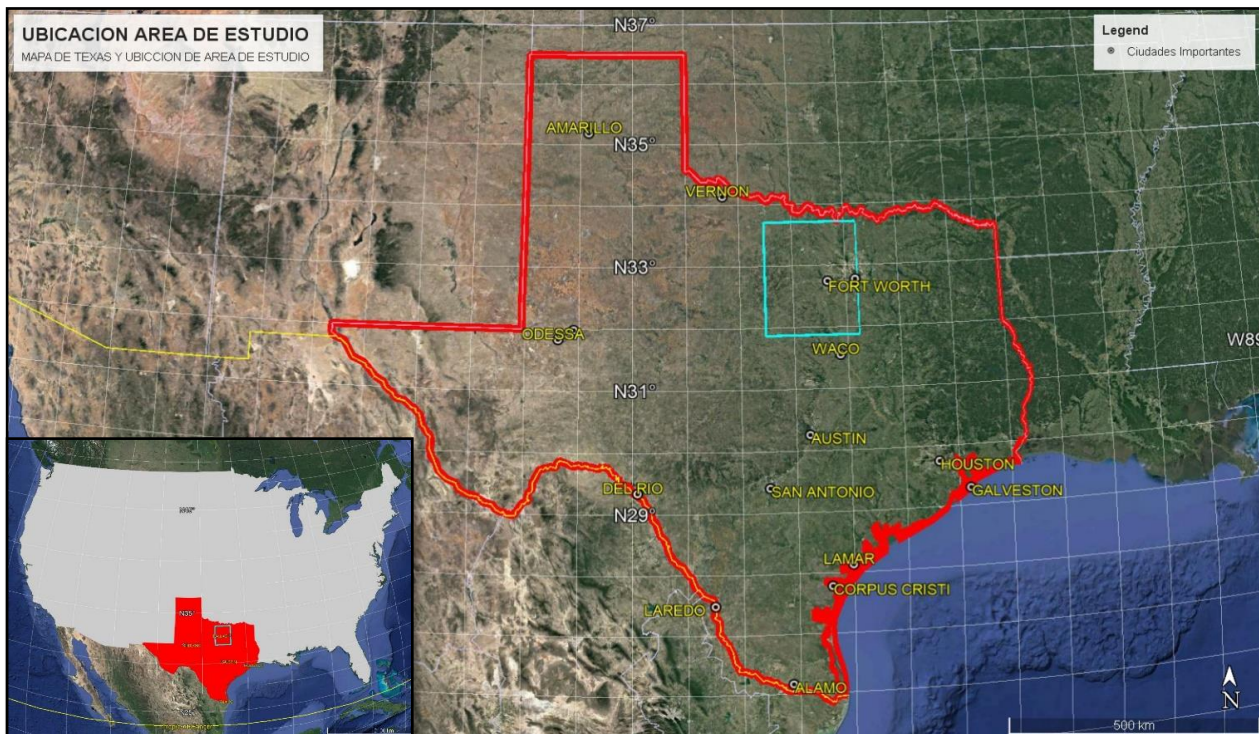
- **Aplicaciones de calor de procesos industriales:** Los procesos industriales que pueden beneficiarse de la energía geotérmica incluyen procesos térmicos como la evaporación, destilación, extracción, lavado y teñido.
- **Otros procesos industriales:** Incluyen operaciones de lavado, procesamiento de pulpa y papel, lavado y teñido de textiles, tratamiento de cuero y pieles, procesamiento de sal, curado y secado de concreto.
- **Salud, recreación y turismo:** Históricamente, las aguas termales geotérmicas naturales se han utilizado para bañarse, nadar y con fines medicinales.

Cabe destacar entonces que el enfriamiento y la calefacción geotérmicos de uso directo, si se implementan ampliamente en el estado, podrían generar ahorros significativos en los costos operativos para los usuarios, aliviar la tensión de la red y pueden hacer una contribución sustancial y material a la descarbonización de la red de Texas.

4- ÁREA DE ESTUDIO

4.a – Localización

El área de estudio se encuentra ubicada en el estado de Texas, Estados Unidos. El área se extiende desde los 33.8° y los 31.50° de Latitud Norte y entre los -98.50° y los -96.67° de Longitud Oeste. La misma abarca unos 27,200 Km² y contiene a las Ciudades de *Dallas* y *Fort Worth* en su porción Oriental limitando el Sur con la Ciudad de *Waco*.



Fuente: Google Earth 2023

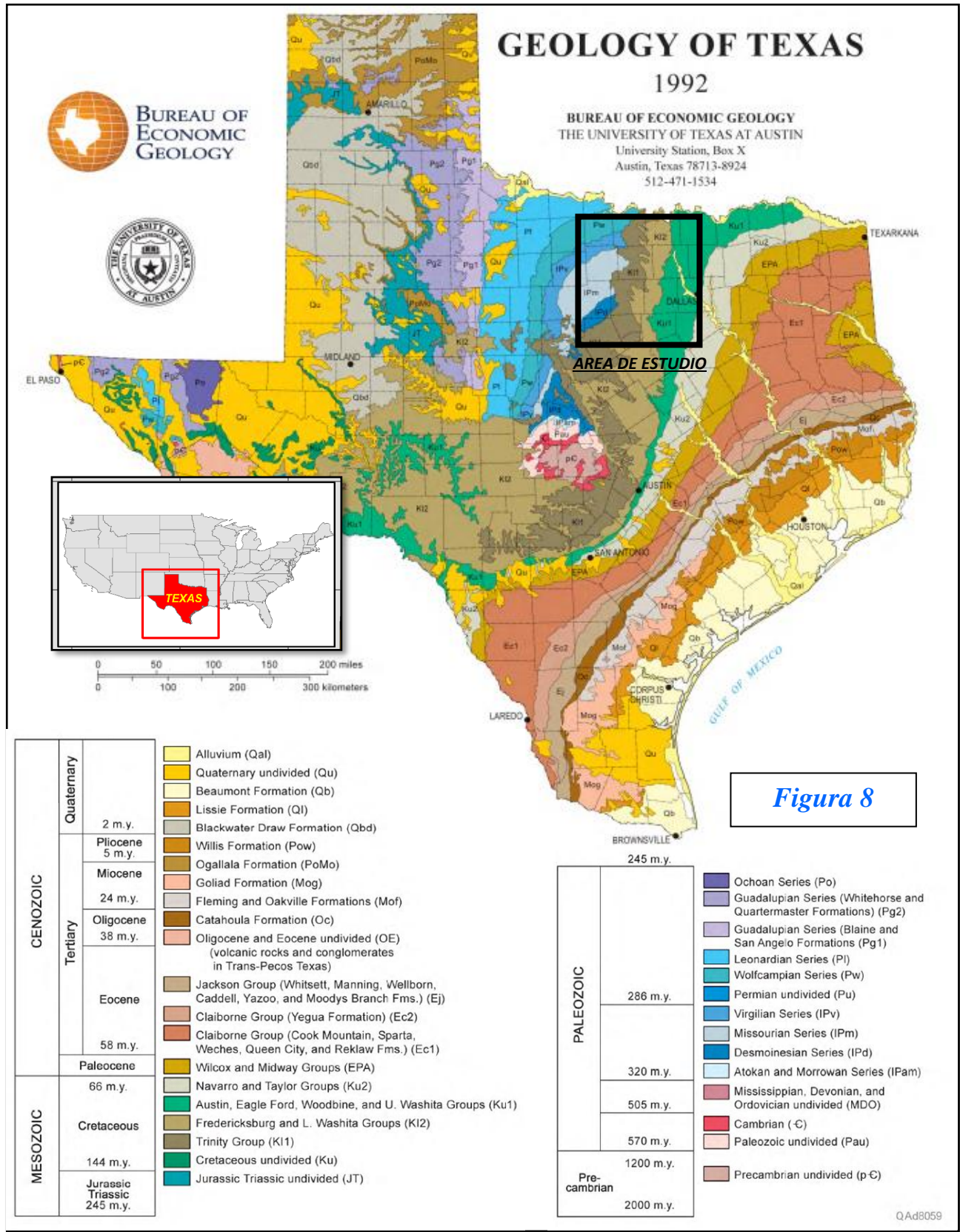


Figura 8: Mapa de Texas: Detalle de la disposición de las rocas por Edades. Tomado de Bureau of Economic Geology, Universidad de Texas en Austin.

4.b - Entorno Geológico

La geología del *Metroplex* de *Dallas-Fort Worth* (DFW) es estable. El área metropolitana se extiende a lo largo del borde occidental de sedimentos inclinados del Cretácico y en el borde este de la cuenca de *Fort Worth*; ambos se superponen al *Texas Cratón*. (**Figura 9**)

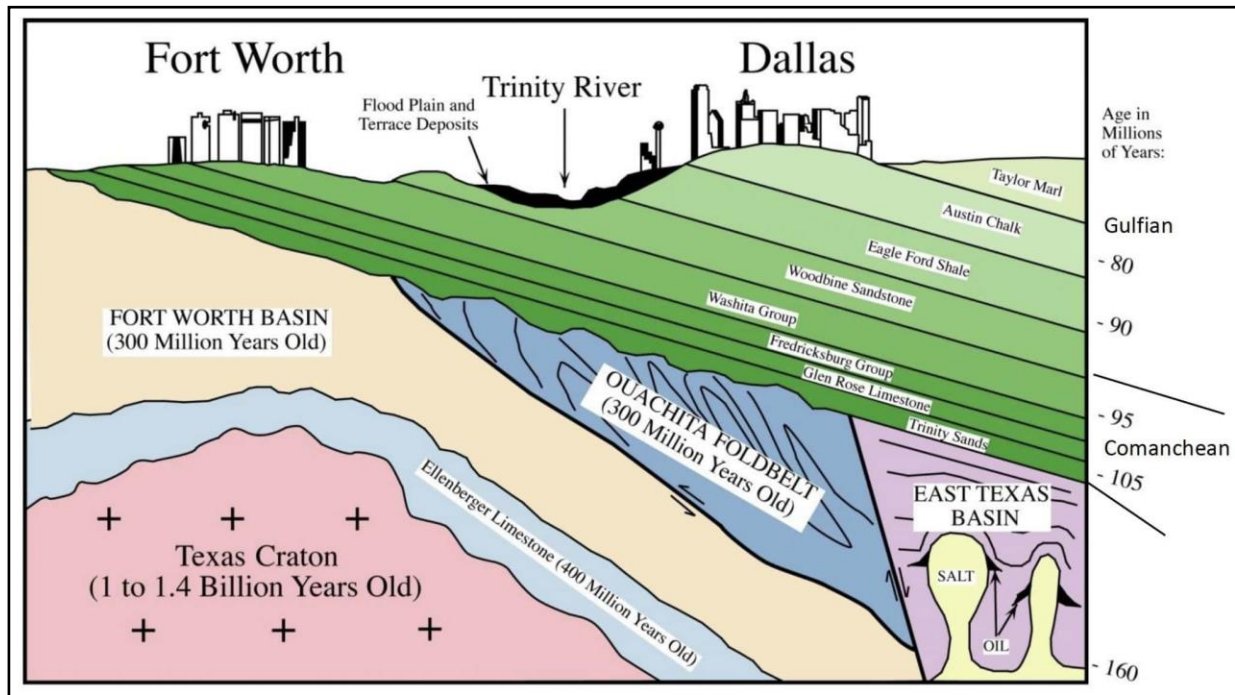


Figura 9: Corte esquemático W-E de la Geología de subsuelo de Metroplex Dallas – Fort Worth. Tomado de Burner & Smosna, 2011.

Un ejemplo directamente observable del cratón se encuentra en *Fredericksburg*, TX, donde aflora en el Área Natural Estatal de *Enchanted Rock*. (Ruzo et al., 2009)

Los afloramientos rocosos estratificados del Cretácico se pueden ver en cortes de arroyos/ríos, cortes de carreteras y canteras. En el área occidental de *Metroplex*, los pinch-outs creados por el basamento, de tendencia ascendente en las rocas inclinadas del Paleozoico, son prolíficos productores de gas natural.

El área se asienta sobre una superficie de sedimentos suavemente inclinados de la edad Cretácico en su mayoría, pero está cubierta sedimentaria oculta un registro geológico mucho más largo. El norte de Texas se encuentra cerca del borde del cratón norteamericano precámbrico. Las rocas más antiguas de Texas datan del Meso-proterozoico y tienen unos 1,600 millones de años. Esto representa la corteza continental de Texas y está cubierta por sedimentos Paleozoicos; estos no se pueden ver en el área de DFW, pero están expuestos en el sur de *Oklahoma* y alrededor de la región *Llano Uplift* del centro de Texas. (**Figura 10**).

Algunos de estos sedimentos contienen importantes depósitos de gas natural, especialmente el *Barnett Shale* de edad Misisipiana (**Figura 11**). La región al oeste de *Weatherford*, Texas, consiste en sedimentos del Pensilvaniano que se inclinan unos pocos grados hacia el oeste. Estos sedimentos se deformaron cuando Gondwana chocó con Laurasia para formar Pangea hace unos 300 millones de años (Ma). Se formó una gran cadena montañosa, la cordillera *Marathon-Ouachita-Appalachian-Variscan*. Este cinturón

montañoso colapsó durante el Triásico y el Jurásico cuando Pangea se rompió, formando la cuenca del Océano Atlántico-Golfo de México. Debido a que la colisión de Pensilvaniano fue seguida por un levantamiento asociado con la ruptura de Pangea, la región de DFW probablemente fue una región montañosa (levantamiento del flanco del rift) que estuvo erosionada durante alrededor de 190 millones de años. Por esta razón, los sedimentos del Pérmico, Triásico, Jurásico y la mayor parte del Cretácico temprano no se encuentran en la región DFW, aunque se encuentran depósitos continentales gruesos de estas edades en el oeste de Texas, Nuevo México y Arizona. El nivel del mar aumentó cuando el supercontinente Pangea se dividió, llegando finalmente a DFW hace unos 100 millones de años, a mediados del Cretácico.

El DFW *Metroplex* se extiende a lo largo de un cinturón de tendencia N-S, con 100 kilómetros de ancho de afloramiento de sedimentos del Cretácico. *Fort Worth* en el Oeste está construida sobre la Serie Comanche del Cretácico Temprano.

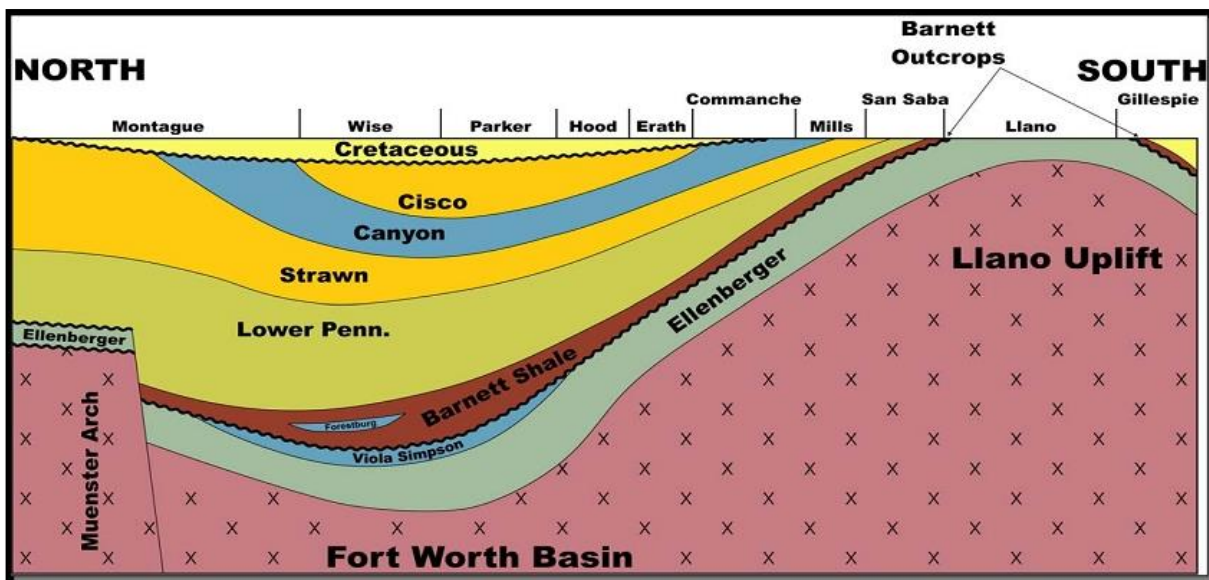


Figura 10: Corte esquemático N-S de la Geología de subsuelo de *Metroplex Dallas – Fort Worth* con indicación de los depósitos sedimentarios de Barnett Shale. Tomado de Burner & Smosna, 2011.

Dallas, en el este, está construida sobre sedimentos de la Serie del Golfo del Cretácico Tardío. DFW yacía en la playa alrededor de 110 Ma, durante el Cretácico temprano. El agua subió sistemáticamente durante otros 30-50 millones de años, por lo que cuando se depositó la tiza de cocolitofórido de *Austin*, el entorno bentónico en que se convirtió en DFW yacía 100 metros o más por debajo de la superficie del mar.

El implacable aumento del nivel del mar solo fue interrumpido por movimientos tectónicos en el sur de *Arkansas* y *Oklahoma*, lo que resultó en la deposición de enormes capas de areniscas de *Woodbine* hacia el sur. Estas areniscas subyacen en las ciudades de *Denton*, *Grapevine* y *Arlington*. Esto es bastante evidente en el suelo arenoso rojizo que se encuentra en casi todas partes. Los sedimentos del Cretácico se sumergen aproximadamente un grado hacia el este, volviéndose más jóvenes hacia el este. Los sedimentos depositados durante el evento de extinción del Cretácico-Terciario, que terminó con la era de los dinosaurios, se encuentran cerca de la ciudad de *Terrell*, TX.

El área de estudio se encuentra centrada en la cuenca de *Barnett Shale* tal como se muestra en el mapa de Petroleo y Gas del estado de Texas. (*Figura 12*)

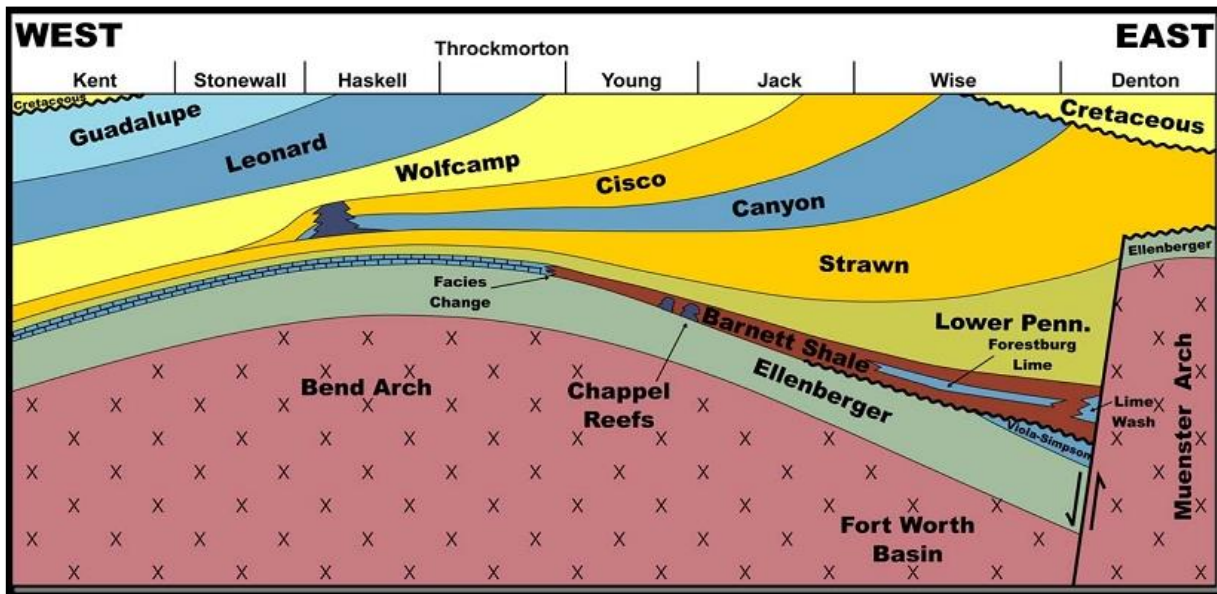


Figura 11: Corte esquemático W-E hacia representando la geología al W de *Fort Worth* donde se observan las areniscas Cretácicas.). Tomado de Burner & Smosna, 2011.

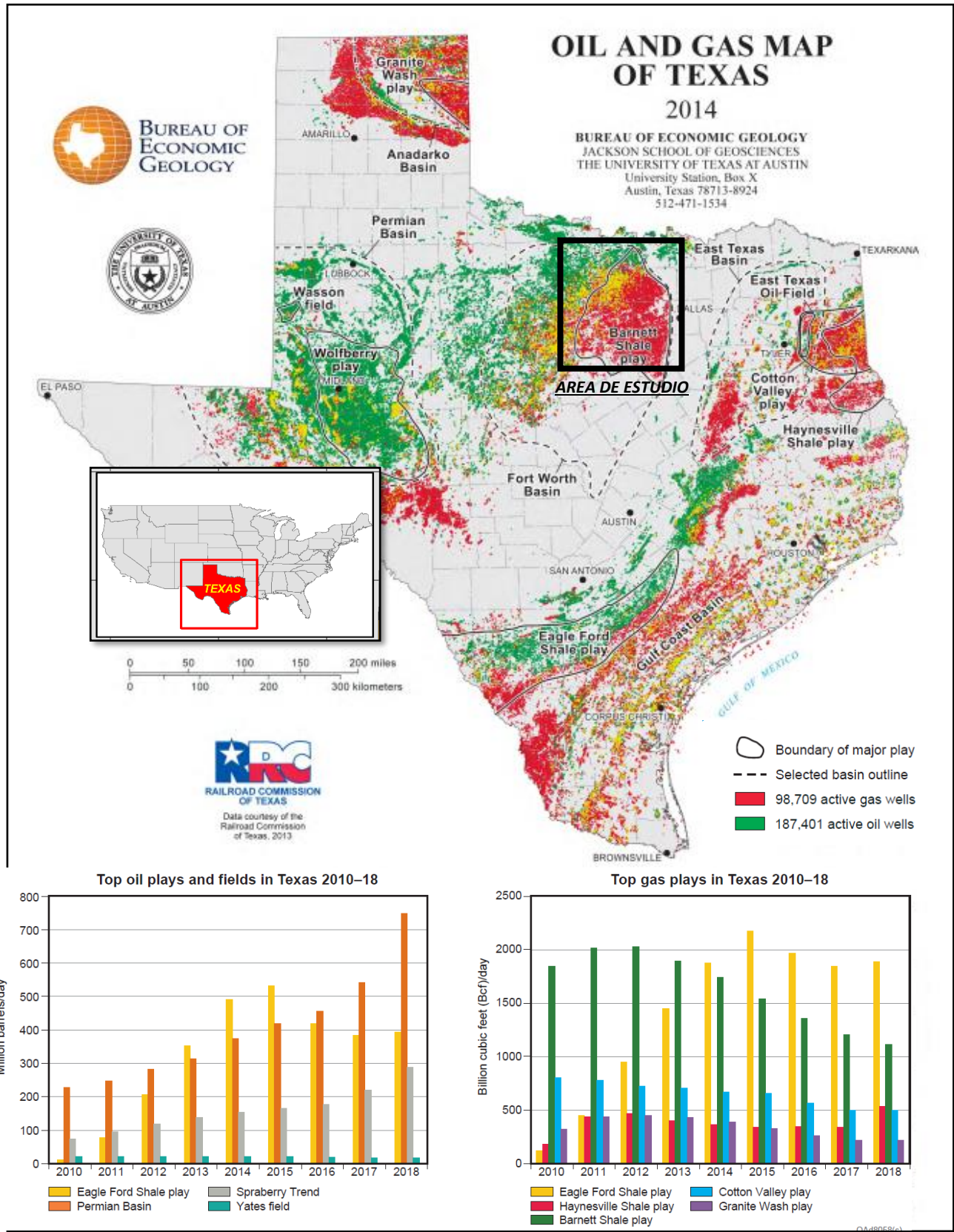


Figura 12: Mapa de Oil and Gas de Texas. Tomado de Rail Road Commission of Texas, 2013.

5- MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología realizada en este estudio permitirá realizar análisis pre-técnicos de factibilidad económica, utilizando el caudal de agua producida, la eficiencia de planta y el costo de electricidad, lo que permitirá la conversión de un campo de hidrocarburos a un campo geotérmico al final de su vida económica "petrolera", incluyendo en estos estudios aspectos geológicos y tecnológicos del sector evaluado.

5.a Bases De Datos

La base de datos para el presente trabajo se derivó de registros de petróleo y gas existentes que pertenecen al *National Geothermal Data System* (NGDS) Project de Estados Unidos, el cual reúne datos geotérmicos recopilados y seleccionados por el Laboratorio Geotérmico de la *South Methodist University* SMU y sus organizaciones asociadas:

- *Siemens Corporate Technology, a division of Siemens Corporation*
- *Bureau of Economic Geology, University of Texas at Austin (BEG)*
- *Cornell Energy Institute, Cornell University*
- *Geothermal Resources Council (GRC)*
- *MLKay Technologies*
- *Texas Tech University (TTU)*
- *University of North Dakota (UND)*
- *Railroad Commission of Texas (RRC)*
- *Information Handling Services, Inc. (IHS)*

Los datos están disponibles para otros investigadores, prospectores y el público en general a través de una variedad de métodos para visualizarlos y descargarlos.

Este proyecto fue apoyado por una subvención de la Ley Estadounidense de Recuperación y Reinversión (ARRA) del Departamento de Energía de los EE. UU. (DE-EE0002852) otorgada al Laboratorio Geotérmico SMU para agregar el flujo de calor y otros datos geotérmicos relevantes para compartir en el *National Geothermal Data System* (Sistema Nacional de Datos Geotérmicos) (NGDS). (Blackwell et. al., 2011)

Las bases de datos disponibles ofrecen conjuntos de datos completos **sin filtrar** disponibles en una serie de formatos adecuados para su descarga en una hoja de cálculo o consumible por aplicaciones que entienden los protocolos *Web Feature Service* (WFS) y *Web Map Service* (WMS) del *Open Geo Consortium*.

Para este trabajo se descendieron las *hojas de cálculo* en formato .CSV, debido a que resultaban más manejables a la hora de realizar diferentes filtros e introducirlas dentro del SIG para su análisis posterior.

Algunas de estas hojas cuentan con 973,450 filas de datos de pozos de Petróleo y Gas de todo el país que pesan aproximadamente > 200 *Megabytes*, lo que requirió efectuar una selección de datos priorizando aquellos ubicados **solamente** dentro del Área de Interés del presente trabajo.

El software de ESRI ArcGIS 10.7 es utilizado para el procesamiento. Este software puede manejar un gran volumen de datos y se ocupó para realizar análisis de idoneidad y ayudar a la selección de targets. También es una poderosa herramienta para visualizar datos nuevos y existentes, al tiempo que evita el error humano durante el proceso de toma de decisiones. Un resumen de los archivos, la información que contienen y la información que se utilizó de cada archivo se presentan en la ***Tabla 1***

Tabla 1: Tabla resumen de los Bases de datos, columnas y campos calculados para la elaboración de mapas.

DESCRIPCION	ENLACE	COLUMNAS UTILIZADAS	Observaciones	CAMPO CALCULADO	Mapas Preliminares usando IDW	COMBINACION DE MAPAS
BEG en la base de datos consolidada de pozos de la Universidad de Texas Contiene BHT sin procesar y corregido, profundidad, ubicación, producción de fluidos, presión, etc. de ~40,000 pozos en todo Texas. La Base de datos contiene 95 Columnas de informacion	http://geothermal.smu.edu/static/Datasets/Zipped/staging_beg_well_view_materialized.zip	wellname	CAMPO REFERENCIA			
		depth_m: Profundidad en metros	Cross Check para profundidad de Pozo con la tabla de WellFluids			
		bht_c_cor Temperatura decimal de fondo de pozo corregida °C	Cross Check para la temperatura de Fondo de Pozo con la tabla de WellFluids			
		watrvol_1_bbl Volumen de agua 1 bbl. La cantidad de agua recuperada durante una prueba.	Cross Check para la producción de Agua en la tabla de WellFluids			
Observación de temperatura de pozo en Content Model Format. Una compilacion a nivel nacional de datos que contienen temperatura y profundidad. Contiene mediciones registradas de equilibrio y valores BHT. Incluye pozos geotérmicos, pozos de petróleo y gas, pozos de agua, pozos de prueba, etc. La Base de datos contiene 55 columnas de Informacion.	Archivo entero en formato CSV (>73 MB)	WellName	CAMPO REFERENCIA			
		Coordenadas Lat - Long				
		EndedDrillingDate: Fecha en la que se termino de perforar el pozo	Se consideraron los pozos perforados despues de 1972			
Observación de producción de fluidos de pozo en Content Model Format Datos de producción de fluidos de la industria del petróleo y el gas de Texas recopilados por BEG. Extraído del archivo BEG Consolidated Wells Contribution. La Base de datos contiene 39 columnas de Informacion.	Archivo entero en formato CSV (>21 MB) http://geothermal.smu.edu/static/DownloadFiles/ButtonsPage.htm?	WellName	CAMPO REFERENCIA			
		Coordenadas Lat - Long				
		FluidType: Tipo de Fluido extraído, agua en todos los casos				
		FluidVolume: Volumen en numeros enteros		Volumen de Agua calculado: m3/ dia, m3/h y lts/seg		
		FluidVolumeUnits: Unidad de medida	BBL (barrels per day)			
		ContactIntervalTop: Tope de la capa de contacto con el fluido en pies	Topo_H2O (m)	Espesor Intervalo de producción de Agua (Espesor acuífero) en metros	Mapa de Espesor del Intervalo Productor de Agua (m)	Mapa de Profundidad de la Base del acuífero (m)
		ContactIntervalBottom: Base de la capa de contacto con el fluido en pies	Base_H2O(m)			
		Temperatura del agua en °C del Intervalo productor	Mapa de Caudal Volumétrico de Producción de Agua Lts/Seg			
Observación de flujo de calor en Content Model Format. Una recopilacion de todos los valores de flujo de calor proporcionados en los diferentes archivos de envio. Combina valores basados en mediciones registradas de equilibrio de múltiples intervalos de profundidad, valores basados en datos BHT y valores de fuentes de datos publicadas. También incluye sitios sin un valor de flujo de calor, pero que tienen otros datos importantes útiles para determinar el flujo de calor, como valores de temperatura "corregidos". La Base de datos contiene 81 columnas de Informacion.	http://geothermal.smu.edu/static/Datasets/Zipped/core_template_heatflow_materialized.zip	WellName	CAMPO REFERENCIA			
		Coordenadas Lat - Long				
		WellDrillDate: Fecha de Comienzo de Perforacion	Cross Check para la producción de Agua en la tabla de borehole			
		DrillerTotalDepth: Profundidad final reportada en m				
		BHT: temperatura tomada en el fondo de pozo en C				
		BHTCorrectedValue: Valor corregido de la temperatura tomada en el fondo de pozo. Metodo de correccion Harrison	BHT Corregida por Harrison		Mapa BHT Temperature	
		IntervalCorrectedGradient: Valor del Gradiente corregido en el intervalo tomado	Gradiente tomado para los calculos	Calculo de la profundidad en la que se encuentran los 70°C de gradiente	Mapa de Gradiente	Mapa de Profundidad calculado de la diferencia entre la Base del Intervalo de Producción de Agua y la Profundidad donde el Gradiente Geotérmico alcanza los 70 °C
		HeatFlowUnits: Unidad en la que se tomo el Flujo de Calor				
		HeatFlow: Valor del flujo de calor	Flujo de Calor tomado para los mapas tomado para los calculos		Mapa de Flujo de calor	

Se efectuaron varios filtros en todas las tablas, tratando de tomar los campos que verdaderamente servirían para esta investigación. Estos filtros consistieron en eliminar aquella información que fuera redundante entre tablas y también se eliminaron aquellas columnas de datos que no fueran de utilidad. Dentro de las tablas existían datos en donde las unidades de medida eran dudosas, mayormente profundidades de pozos e intervalos de producción de agua lo que requirieron un cuidado extra y consulta a profesionales de la materia para obtener una guía acerca de las unidades utilizadas.

A partir de las tablas filtradas, nuevos datos fueron calculados a fin de poder realizar los mapas preliminares para luego producir el mapa de favorabilidad resultado.

La *relación entre las distintas tablas* se llevó a cabo por medio de las columnas comunes entre ellas lo que permitió la correlación de los datos: Estas columnas fueron **Nombre De Pozo** (*WellName*) y las coordenadas de los mismos (Latitud y Longitud, *WorldMercator WGS84*).

La primera base de datos: *staging.beg_well_view_materialized.csv* (con 95 columnas de información) se trata de datos consolidados de la Universidad de Texas con más de 40.000 pozos de todo el estado. De toda la información provista, los datos utilizados aquí fueron la profundidad de los pozos, temperatura de fondo de pozo, gradiente y volumen de agua recuperada en los pozos en BBL (Barriles por día).

La segunda tabla: *core.template_borehole_materialized.csv* (55 columnas) posee, entre otros muchos datos, temperatura, profundidades y las fechas de terminación de perforación de los pozos, dato que se consideró como esencial ya que la reutilización de los mismos depende de la antigüedad en la que estos hayan sido terminados/abandonados. A este respecto se tomaron pozos con fechas posteriores a 1972.

Se tomó en cuenta una tercera base de datos: *core.template_wellfluid_materialized.csv* (39 columnas de información) la cual es una compilación de producción de fluidos de la industria de petróleo y gas. Esta tabla fue muy útil, dando datos certeros de la producción de agua de cada pozo y permitió hacer un control de los mismos mediante un *cross check* con la primera tabla. De aquí se tomaron, además del volumen de producción de agua en BBL (Barriles por día) la base y tope del intervalo productor en **pies** (que se convirtió a metros) que permitió, mediante el cálculo de la diferencia de los mismos, obtener del espesor del intervalo productor para su posterior representación por medio del método IDW en un mapa de espesor.

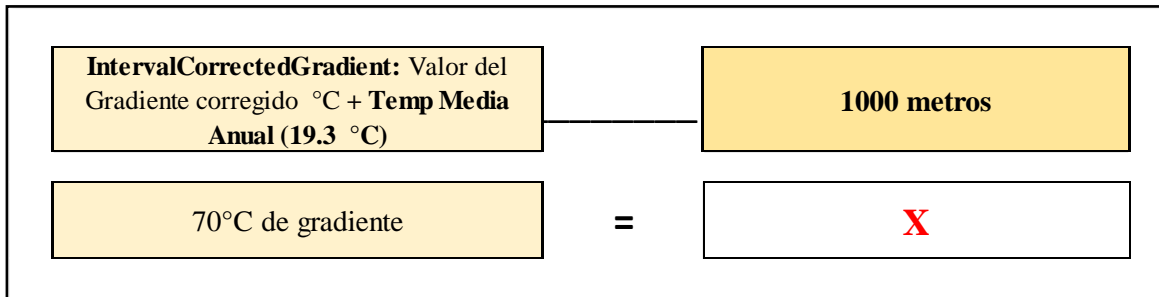
Además del cálculo del espesor del intervalo productor, se calcularon dos nuevos campos tomando el volumen de agua de producción. Se tomó el volumen de agua de BBL y se convirtió a $\text{m}^3/\text{día}$, m^3/hora y también a litros/segundo, siendo este último campo el utilizado para la elaboración de mapas y cálculos posteriores de potencial y uso geotérmico.

Una cuarta y última base de datos se utilizó: *core.template_heatflow_materialized.csv* (con 81 columnas de información). Esta posee una recopilación de todos los valores de flujo de calor proporcionado por distintas fuentes. Combina valores basados en mediciones registradas de equilibrio de múltiples intervalos de profundidad, valores basados en datos BHT y valores de fuentes de datos publicadas. También incluye sitios sin un valor de flujo de calor, pero que tienen otros datos importantes útiles para determinar el flujo de calor, como valores de temperatura "corregidos" (por el método de corrección de Harrison). De esta se extrajeron los datos de fecha final de perforación para cruzarla con las fechas aportadas por la primera base de datos. También profundidad de la perforación anotada por el perforista, Temperaturas de fondo de pozo en $^{\circ}\text{C}$, valor corregido de la temperatura de Pozo en $^{\circ}\text{C}$, Valor de intervalo de gradiente y valor de flujo de calor.

Utilizando los valores de *gradiente* y *profundidad* se calcularon dos nuevas columnas:

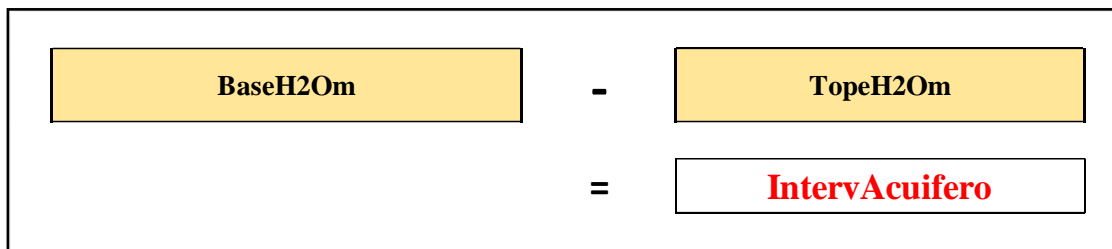
- *Cálculo de la profundidad en la que se encuentran los 70°C de gradiente*

La temperatura media anual de Dallas (DFW) es de **19.3 °C**, de acuerdo con el portal *Climate Data*. Esta temperatura es la que se debe tener en cuenta como temperatura de Boca de Pozo y la que debe sumarse al gradiente corregido de la base de datos para poder efectuar el cálculo. Como las unidades del Gradiente son °C/Km se deduce que:



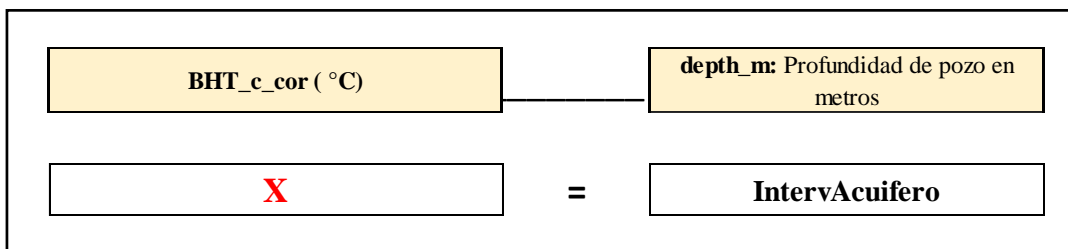
- *Temperatura del agua en °C del Intervalo productor:*

Como primera medida se calculó la distancia media entre la base y tope del acuífero a fin de discretizar el resultado para que se ajuste de una manera ponderada a la realidad.



Una vez hecho esto se procedió a calcular la temperatura del agua en el intervalo productor usando los cálculos previos y la BHT en grados centígrados (Temperatura de Fondo de Pozo).

Aplicando una regla de tres simple:



*Cabe destacar que, de las bases de datos consideradas para el presente trabajo, **ninguna** de ellas posee registros de presión de pozo, dato que podría utilizarse como una herramienta para la estimación del gasto de agua descargada, sumando información para el procesamiento de los datos y por ende aportando más elementos para sustentar el resultado de dicho proceso.*

5.a.1 Tratamiento Adicional de los datos

Luego de lo realizado en la sección anterior se utilizaron algunos criterios adicionales para hacer un filtrado mayor de los datos y así contar con aquellos que fueran de mayor utilización para el presente trabajo:

- 1) Determinar la edad del pozo con base en la fecha de finalización de la perforación. Así se tuvieron en cuenta pozos cuyo año de finalización no fuera más antiguo que 1972.
- 2) Contar con pozos que posean producción de agua dentro de sus datos.
- 3) Obtener datos de temperatura medidos de registros de pozos de hidrocarburos, ya sea en boca de pozo, final de pozo, gradiente y flujo de calor medidos en el pozo, si están disponibles.
- 4) Obtener datos de producción de los acuíferos
- 5) Evaluar opciones y aplicaciones tecnológicas de reutilización

Es de destacar que en algunos pozos existían intervalos de producción que se superponían volviéndose engorroso el tener una idea acabada de los volúmenes de producción de agua por pozo. Además de lo anterior existían intervalos menores a 10 metros con volúmenes de producción de agua menores a 0.1 l/s (litros/segundos), lo que, al realizar el análisis espacial de los datos, deformaría mucho las interpolaciones de los mismos.

Para evitar la influencia de estos datos, como primera medida, se utilizó el comando *Definition Query* el cual, mediante expresiones, permite efectuar consultas de las tablas en ArcGIS. Con este se puede realizar la selección de un subconjunto de entidades y registros de tablas. Al poseer este comando, una sintaxis determinada, mediante la que realiza un filtro por atributos, genera consultas para establecer una definición de capa. Aquí se introdujeron las consultas para filtrar los intervalos menores a 10 m y volumen de producción de agua menores a 0.1 lts/seg. (**Figura 13**)

Aquí se describe cómo crear expresiones básicas con cláusulas *WHERE*. Una referencia más detallada se observa en la siguiente figura:

La expresión utilizada fue:

```
SELECT "FROM DATA BASE" WHERE:
```

```
"lts_seg" >=0.1 AND "Interv_m" >=10
```

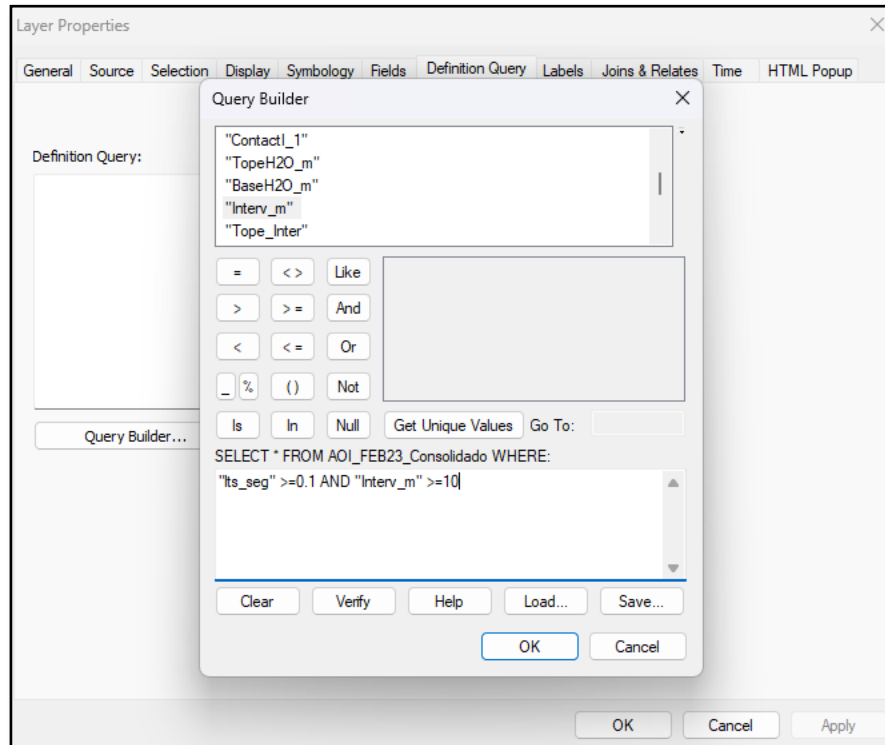


Figura 13: Comando de consulta “*Definition Query*” en las propiedades de la capa en ArcGIS

Para manejar la **superposición de intervalos** se utilizó la herramienta *Summarize* (resumir) (**Figura 14**). Al utilizar esta herramienta se resumen los datos en una tabla, usando operaciones estadísticas, sacando como resultados valores de conteo, promedio, mínimo y máximo, y obtener exactamente la información que desea. ArcMap crea una nueva tabla que contiene las estadísticas de este resumen.

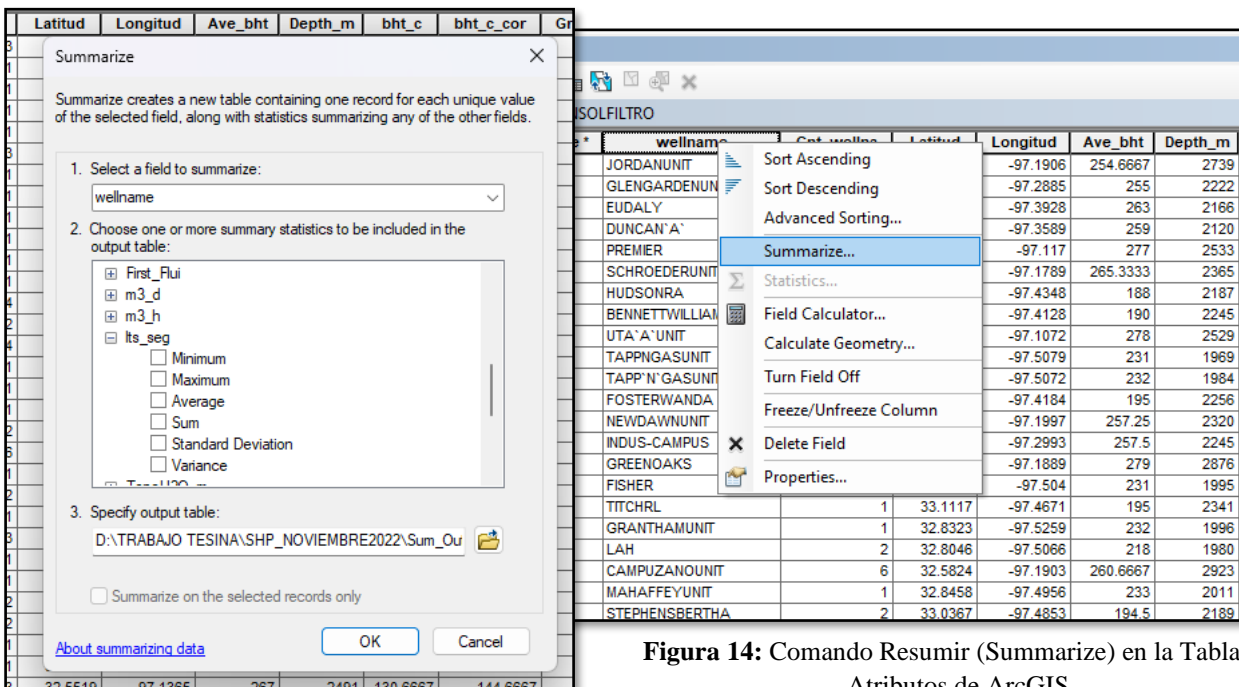


Figura 14: Comando Resumir (Summarize) en la Tabla de Atributos de ArcGIS

Los criterios estadísticos aplicados para *resumir* nuestra base de datos se sintetizan en la **Tabla 2**:

Tabla 2: Criterios estadísticos utilizados en el comando Resumir (*Summarize*)

Columna1	Operacion
Latitud	Promedio
Longitud	Promedio
depht_m	Maximo
bht_C	promedio
bht_c_corr	Promedio
GradC_1000m	Promedio
Heath Flow	Promedio
ProfGra100	Promedio
ProfGra70	Promedio
WaterVol	Suma
FluidVol	Suma
m3/d	Suma
m3/h	Suma
lts/seg	Suma
TopeH2O_m	Minimo
BaseH2O_m	Maximo
Interv_m	Suma
Contenido Medio	Promedio
TempC_H2O	Promedio
Depth	Maximo
GradienteMedido	Promedio
HF	Promedio

Esto permitió establecer:

- Volumen total de agua producido por pozo
- Espesor total del intervalo de producción por pozo
- Promedio de la temperatura del agua producida por pozo

Una vez aplicada toda esta metodología a la Base de Datos la cantidad de pozos a utilizar para el presente trabajo **quedo reducida de 3323 a 905 pozos**.

Se tuvo en cuenta un rango de temperatura utilizable de acuerdo a las plantas de energía binarias (ORC) para la generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de temperaturas más bajas. Estas plantas establecen que la temperatura de entrada mínima requerida es de 65-70 °C con un caudal mínimo de entrada de 3 lts/seg con la generación máxima de 180 kWe.

La capacidad de energía está determinada principalmente por la tasa de producción, la temperatura del agua producida, la temperatura ambiente, la salinidad del agua, la eficiencia de conversión de la planta de energía geotérmica, la eficiencia de transferencia de calor entre las rocas del yacimiento y el fluido circulante, etc.

5.b Interpolación IDW y Operación entre capas Ráster

Como primer paso se utilizaron las bases de datos y se importaron ingresaron los datos de interés en el Software ArcMap donde, mediante la creación de *shapefiles* (archivo de datos nativos del software) se fueron construyendo los distintos archivos ráster, producidos a partir de la interpolación de los datos de pozos, utilizando el método de interpolación IDW (Ponderación de Distancia Inversa). Este método es uno de los más simples y determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra. La ponderación es una función de la distancia inversa. La superficie que se interpola debe ser la de una variable dependiente de la ubicación. Este método presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra. (*Figura 15*)

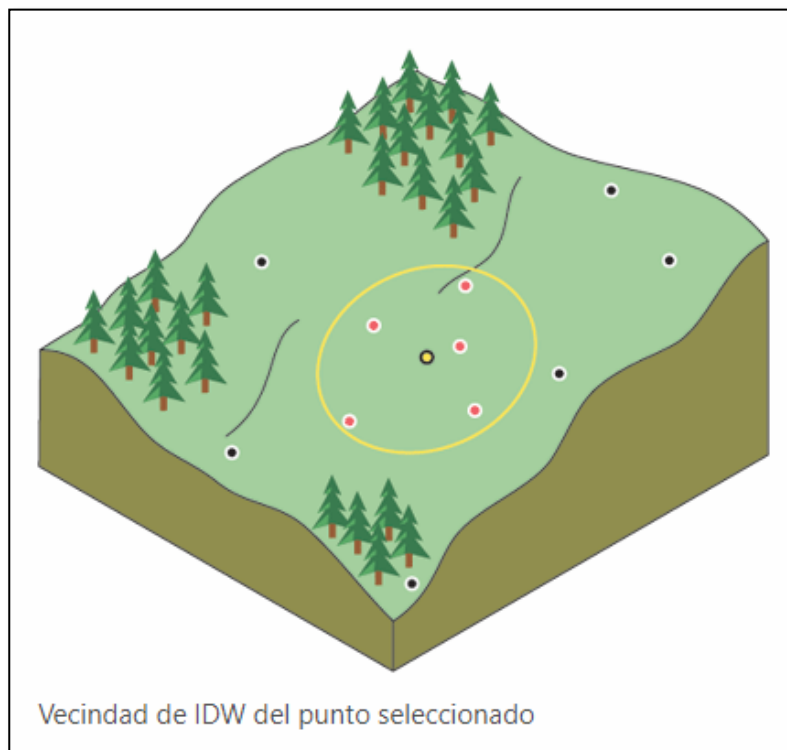


Figura 15: Esquema espacial para la interpolación IDW

Los datos utilizados para estas interpolaciones fueron:

- *Flujo de Calor*
- *Gradiente Geotérmico*
- *Profundidad de Base del Acuífero*
- *Volumen de Producción de Agua*
- *Temperatura del Agua en el intervalo productor*
- *Profundidad a la que se encuentran los 70° C de gradiente geotérmico*

Una vez obtenidas todas las interpolaciones de los datos en cuestión, estos mapas ráster se emplean posteriormente para el procesamiento y la aplicación del Modelo Booleano.

Como primera medida, se efectuó una sustracción a través de álgebra de ráster para calcular la *Diferencia de profundidad entre la Base de Acuífero y la Profundidad a la que se encuentra la temperatura de 70°C* con el objetivo de producir una capa ráster que refleje esta profundidad (Mapa de Diferencia de Profundidades) (*Tabla 3*).

Tabla 3: Mapas producidos a partir del método de interpolación IDW y mapa resultante de la operación de resta entre rásters



5.c- Modelo Booleano

Este método está basado en el álgebra de Boole, por lo que se considera como un modelo simple y fácil de implementar y es uno de los preferidos en los sistemas de recuperación de información temprana. Este requiere de la aplicación de **operadores condicionales** que resultan en mapas binarios que, combinados de manera lógica, permiten la corroboración o no de una hipótesis o propuesta. (Bonham-Carter, 1994)

En este trabajo, estos mapas binarios, se utilizan como una **capa de evidencia**, y una vez combinados, permiten apoyar la hipótesis del potencial geotérmico de un área como "zona favorable que contiene pozos petroleros, factibles para su aprovechamiento geotérmico".

En el empleo de estas técnicas se hace necesario la definición de **condiciones de entrada** de los datos, que se definen como atributos que deben cumplir las capas para poder ser consideradas y combinadas en el Análisis Espacial de las mismas.

Para el presente trabajo las **capas de evidencia** fueron establecidas de acuerdo a los datos que se ponderaron por intermedio de la interpolación. La siguiente tabla muestra las capas de evidencia, los parámetros usados para el análisis espacial de las capas, por medio de una reclasificación de las mismas estableciendo los umbrales o condiciones de entrada para cada capa. (*Tabla 4*).

Mediante la reclasificación de los mapas interpolados, se asigna un valor de **1** a los Píxeles que *cumplen* con los operadores condicionales determinados (*Verdadero o SI*) (*Figura 16*) y que son los que se ajustan al *Modelo Conceptual* (*Figura 17*) para este caso de estudio. El resto de los píxeles, por lo tanto, tendrán un valor de **0** (*Falso o NO*).

Tabla 4: Lista de conjuntos de mapas con sus operadores condicionales

		OPERADORES CONDICIONALES	
CAPAS RASTER	METODO	FALSO (NO) = 0	VERDADERO (SI) = 1
FLUJO DE CALOR	Reclasificacion	Temperatura <71°C	Temperatura >71°C
PRODUCCION DE AGUA	Reclasificacion	< 1 lts/seg	> 1 lts/seg
ESPESOR DE ACUIFERO	Reclasificacion	< 100 m	> 100 m
DIFERENCIA DE PROFUNDIDADES	Reclasificacion	< 0 m	> 0 m

Posteriormente estas reclasificaciones se combinan mediante operaciones lógicas (AND, OR) (Noorollahi et.al., 2008) o algebraicas, como en nuestro caso, donde se realiza una operación matemática entre imágenes ráster (multiplicación) para discriminar el área donde la superposición de todas las imágenes ráster nos daría el valor = 1. (Figura 18 y 19)

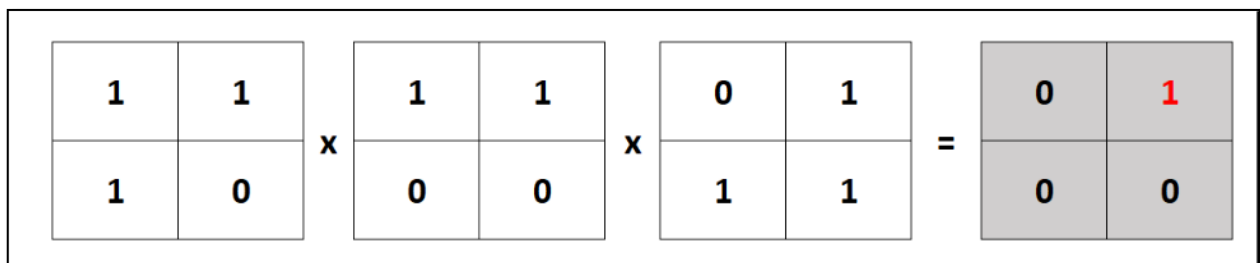


Figura 16: Esquema de asignación de valores 1 y 0 a los pixeles y resultado de operación algebraica.

El resultado final es una imagen ráster en la que se identifican áreas donde estos *operadores condicionales se cumplen* y que contrastan con las demás áreas que no las cumplen. Es así que se obtiene un mapa resultante de **favorabilidad**, donde pueden discriminarse áreas **Favorables** o **NO Favorables** para la prospección Geotérmica dentro del mapa. En este punto, esta metodología permite responder dos preguntas fundamentales: ¿Dónde se encuentran los objetos que cumplen con las siguientes condiciones? y ¿Dónde se localizan? (Yousefi et.al. 2010)

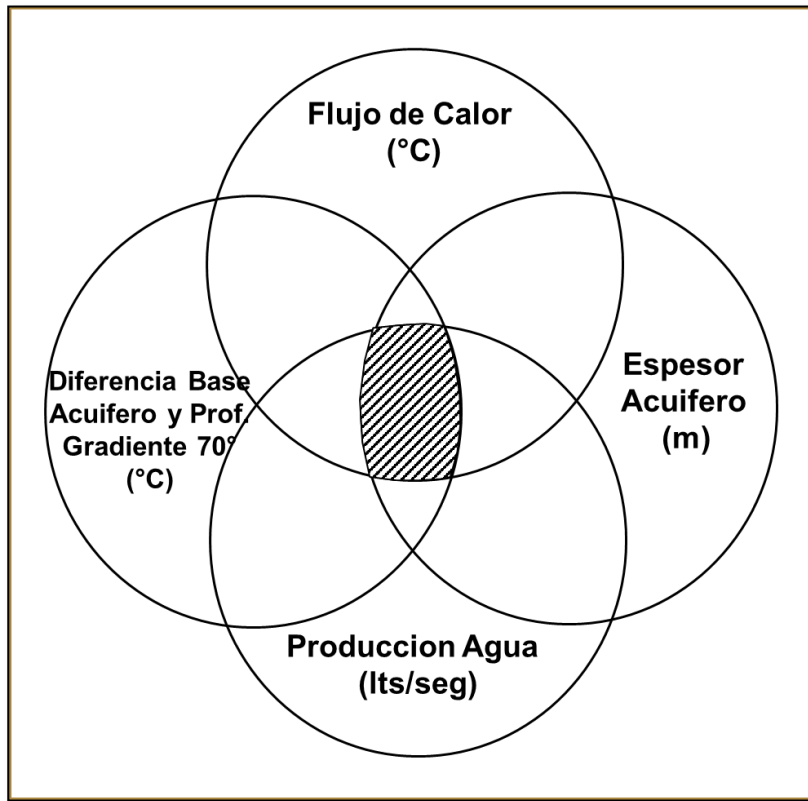


Figura 17: Modelo Conceptual del Área de Estudio (área favorable en el centro del modelo).

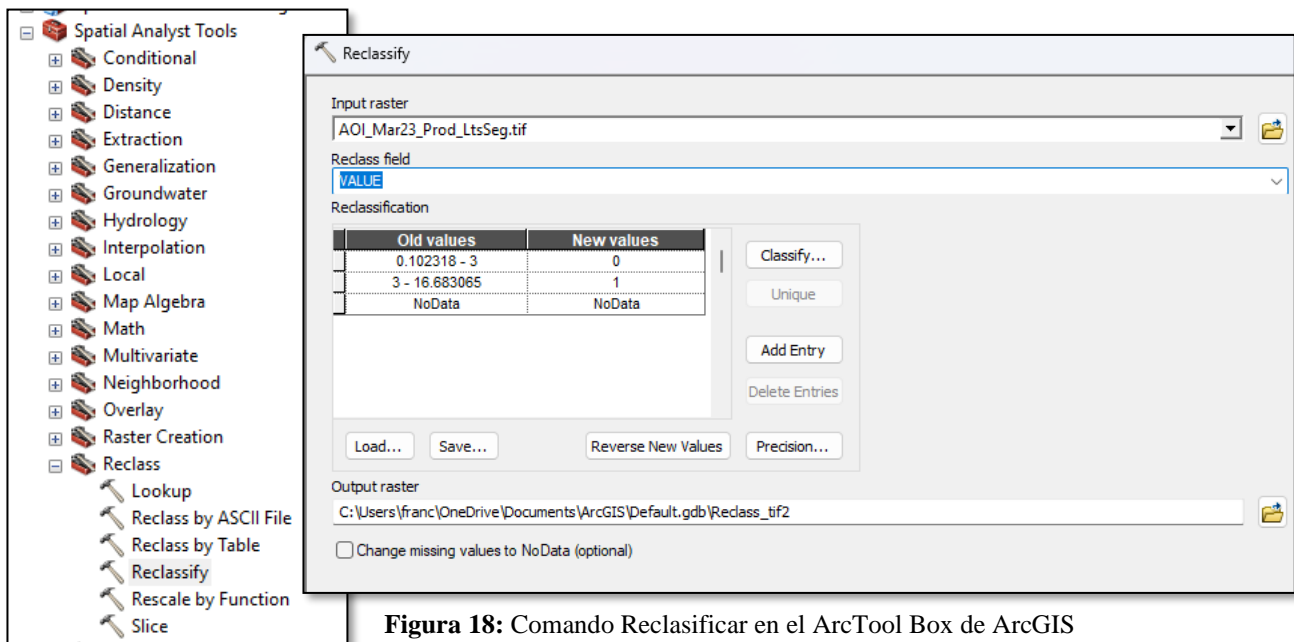


Figura 18: Comando Reclassificar en el ArcTool Box de ArcGIS

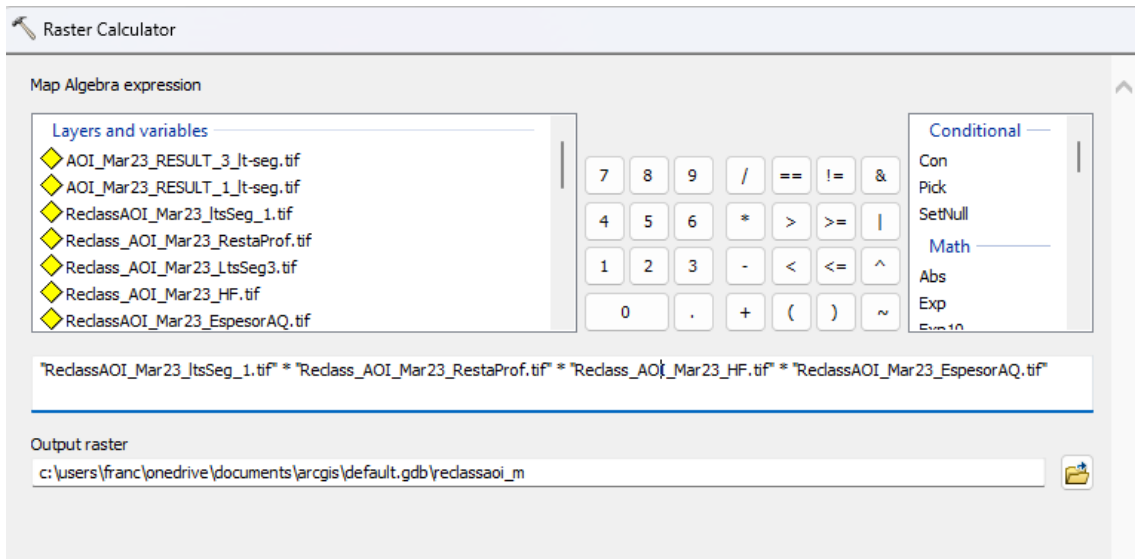


Figura 19: Multiplicación de ráster en ArcTool Box de ArcGIS

RESULTADOS

En este apartado se presentan los mapas con interpolación de los datos de pozo, los mapas resultantes de la reclasificación mediante el análisis espacial de los mismos (capas de evidencia binarios) y el mapa resultante de la combinación de los anteriores, donde es posible identificar las áreas **favorables** para la prospección Geotérmica en el sector Oeste de *Dallas – Fort Worth*, estado de Texas.

6.1- Mapas interpolados por el método IDW y mapa producto de la resta entre capas ráster

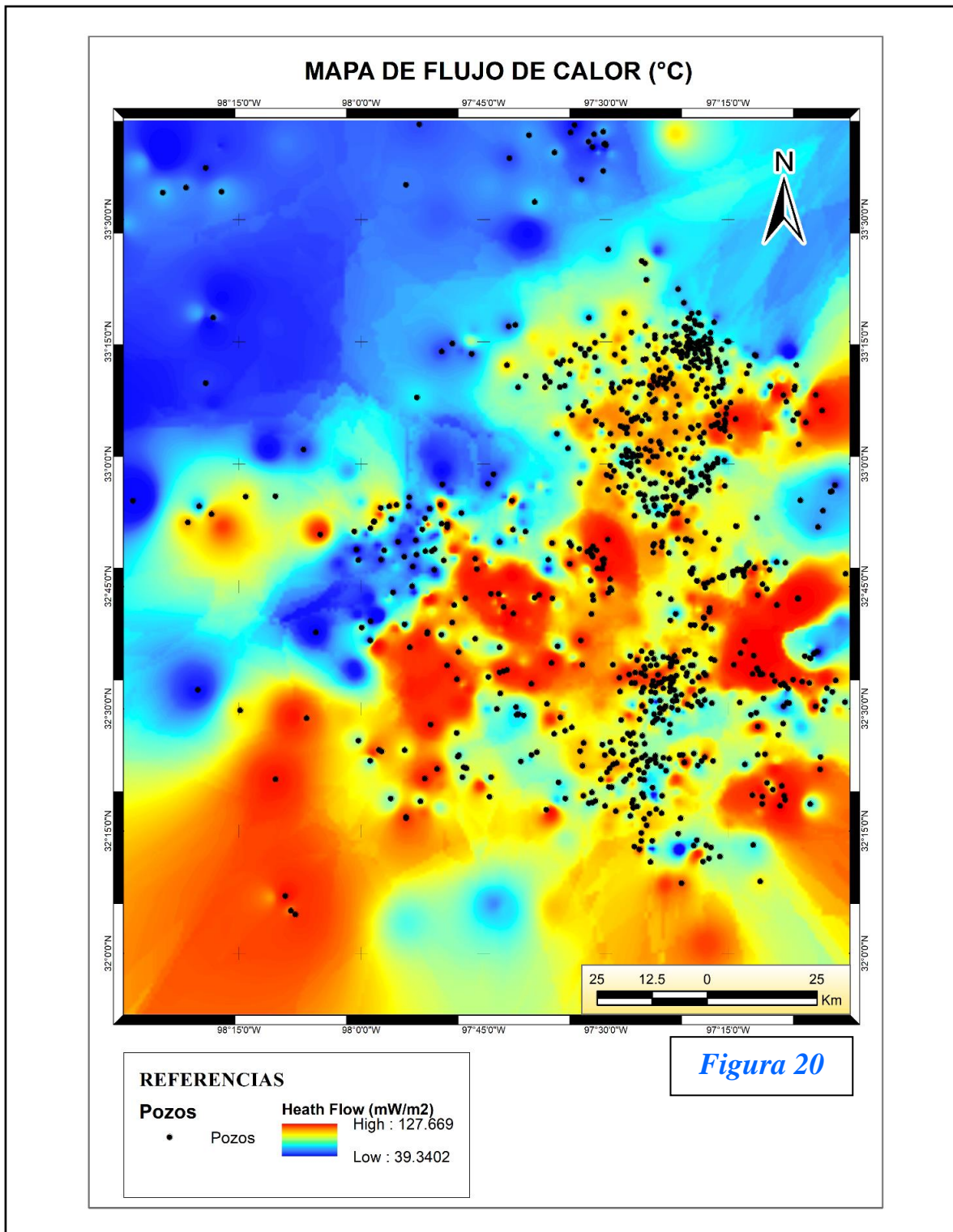


Figura 20. Mapa de Flujo de Calor: Para este mapa se tomaron los 3323 pozos a fin de tener una mejor representatividad del Flujo de Calor. Se observa un rango de temperaturas que van desde los 39.34°C a los 127.7°C ubicándose las mayores temperaturas en el Sur-Oeste y centro del área de estudio con algunos picos en el extremo Sur-Este.

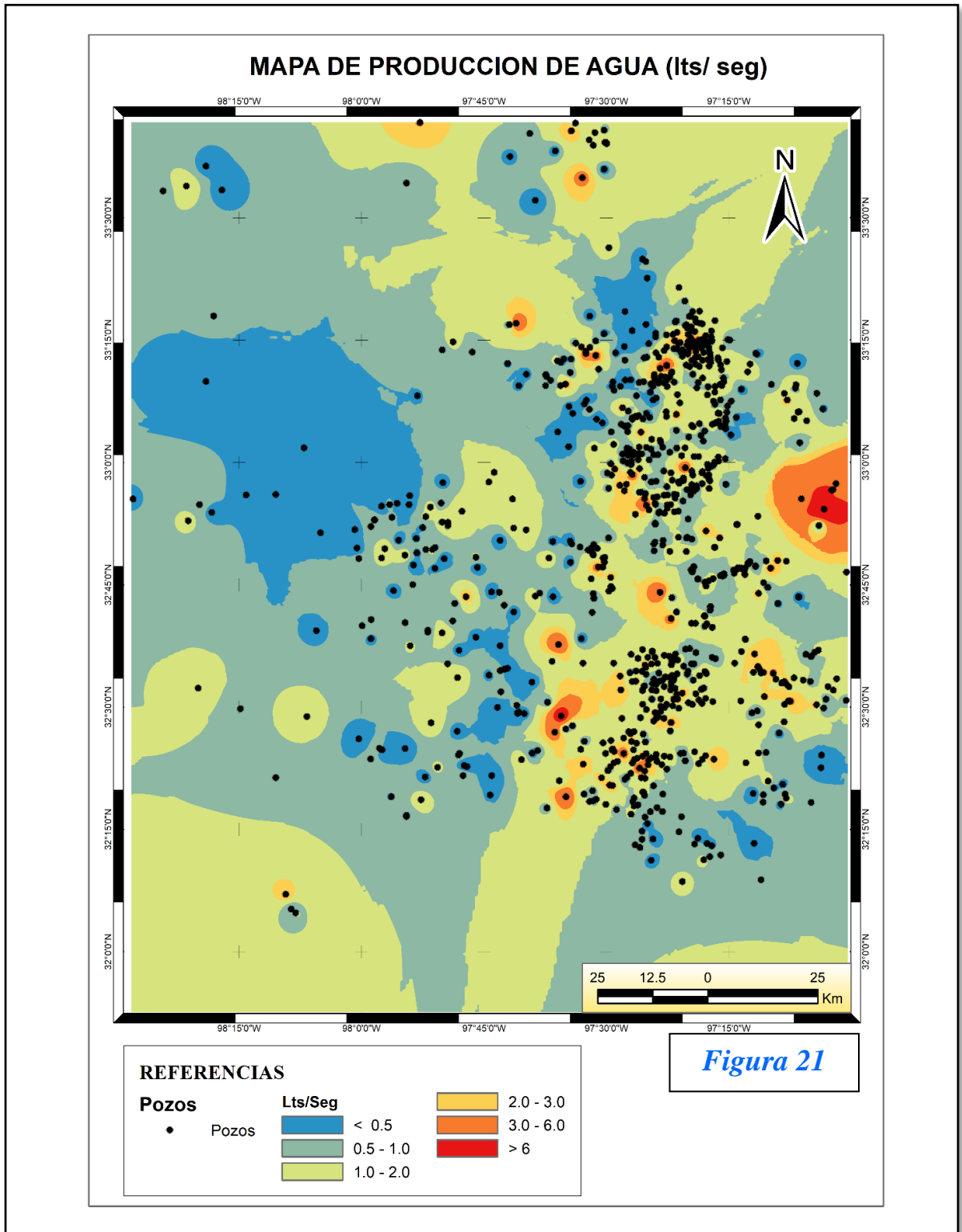


Figura 21. Mapa de Volumen de Producción de Agua: Los mayores volúmenes producidos se encuentran en el Centro-Este con importante presencia en el extremo Este. Los Volúmenes registrados van desde valores menores de 0.5 l/s a mayores a 6 l/s (litros/segundo).

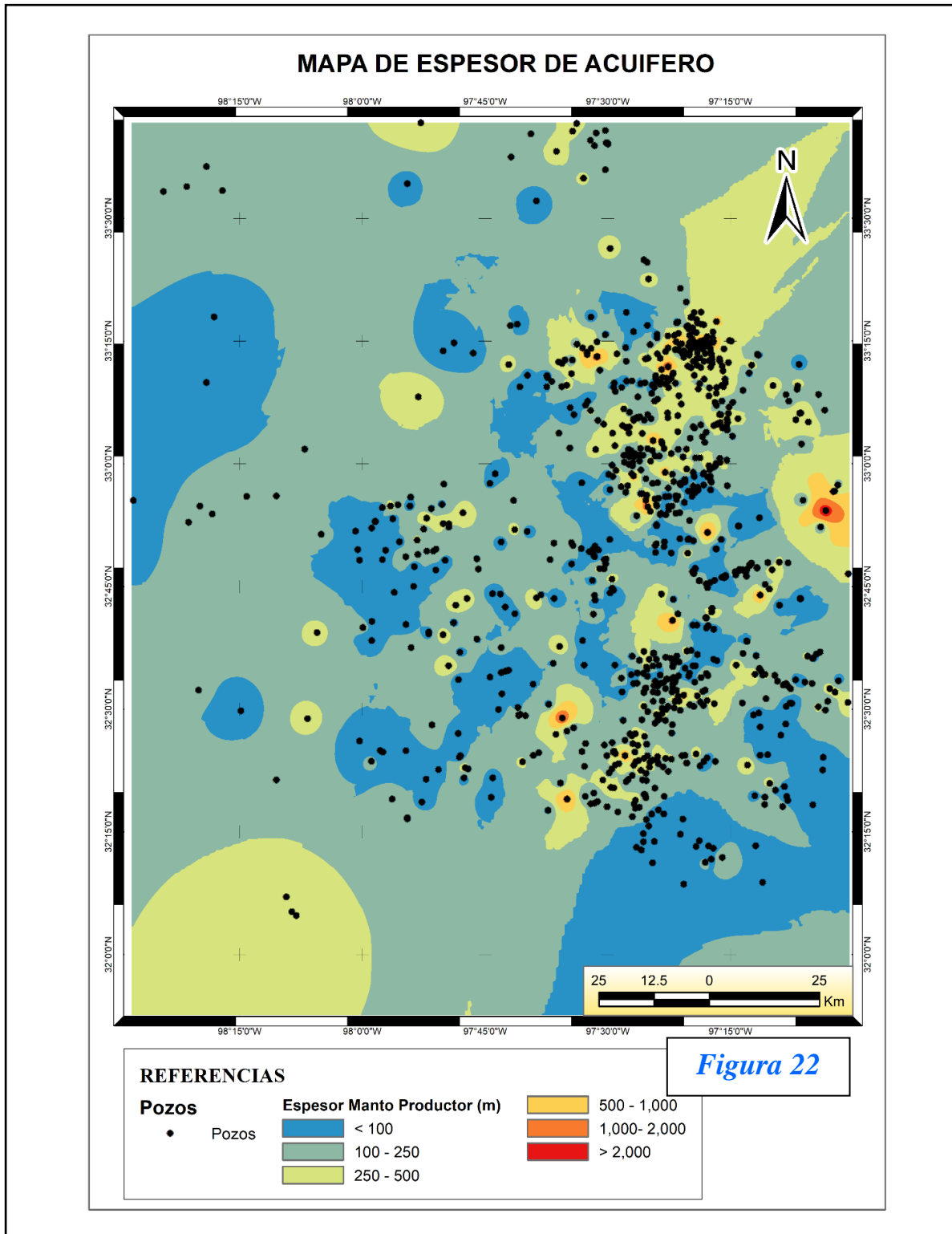


Figura 22. Mapa de Espesor del Acuífero (m): Este mapa, construido con los datos del espesor del acuífero confirma las dimensiones propicias para contener altos volúmenes de agua siendo el espesor de mayor representatividad > a 100 metros.

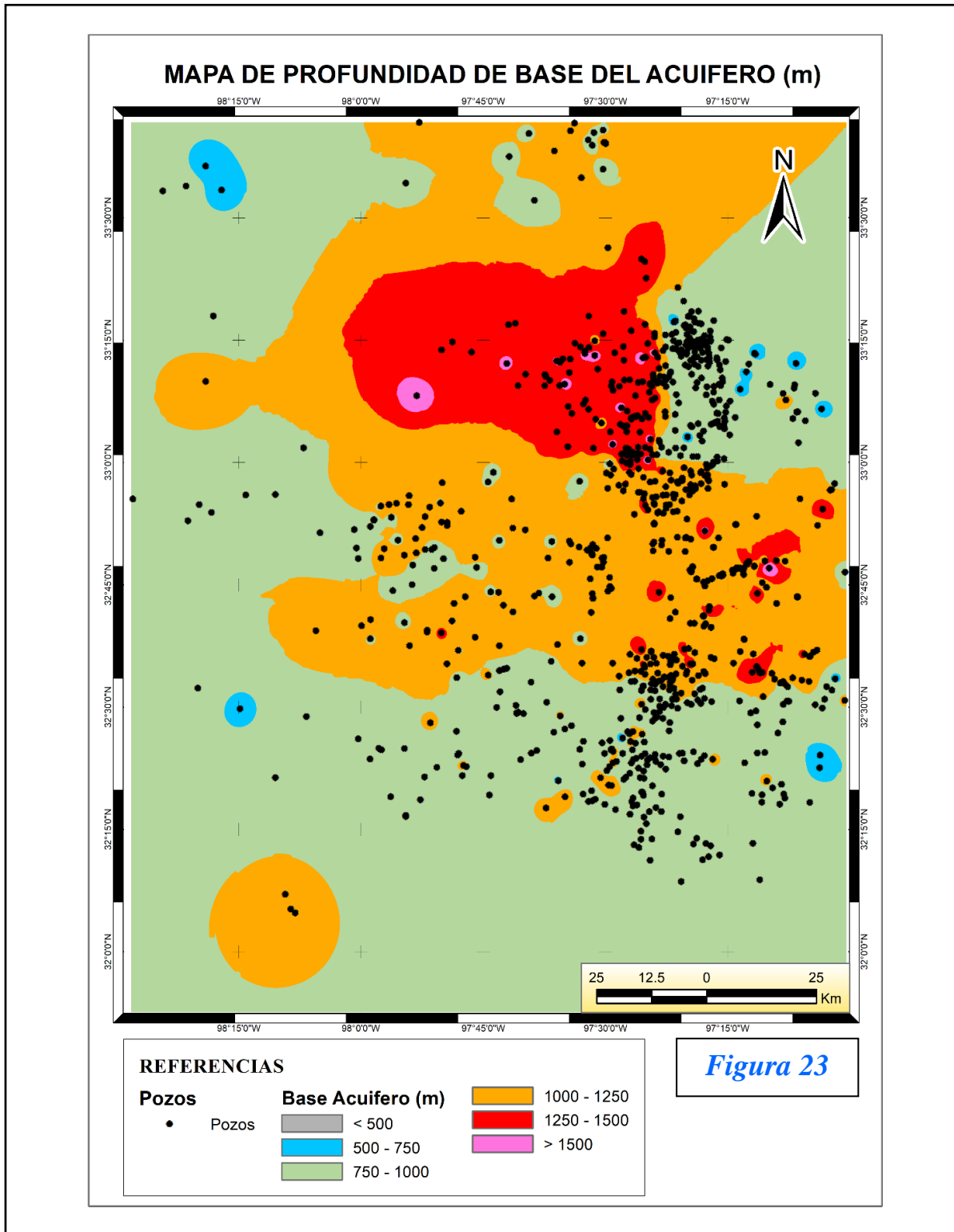


Figura 23. Mapa de Profundidad de base del Acuífero: Este mapa muestra que podemos encontrar la mayor parte del acuífero a profundidades de entre 750 a 1000 m. Se observa también profundidades que van desde 1000 a 1250 m y que coinciden con el área de mayor volumen de agua, ubicada en el centro-Este del área de interés.

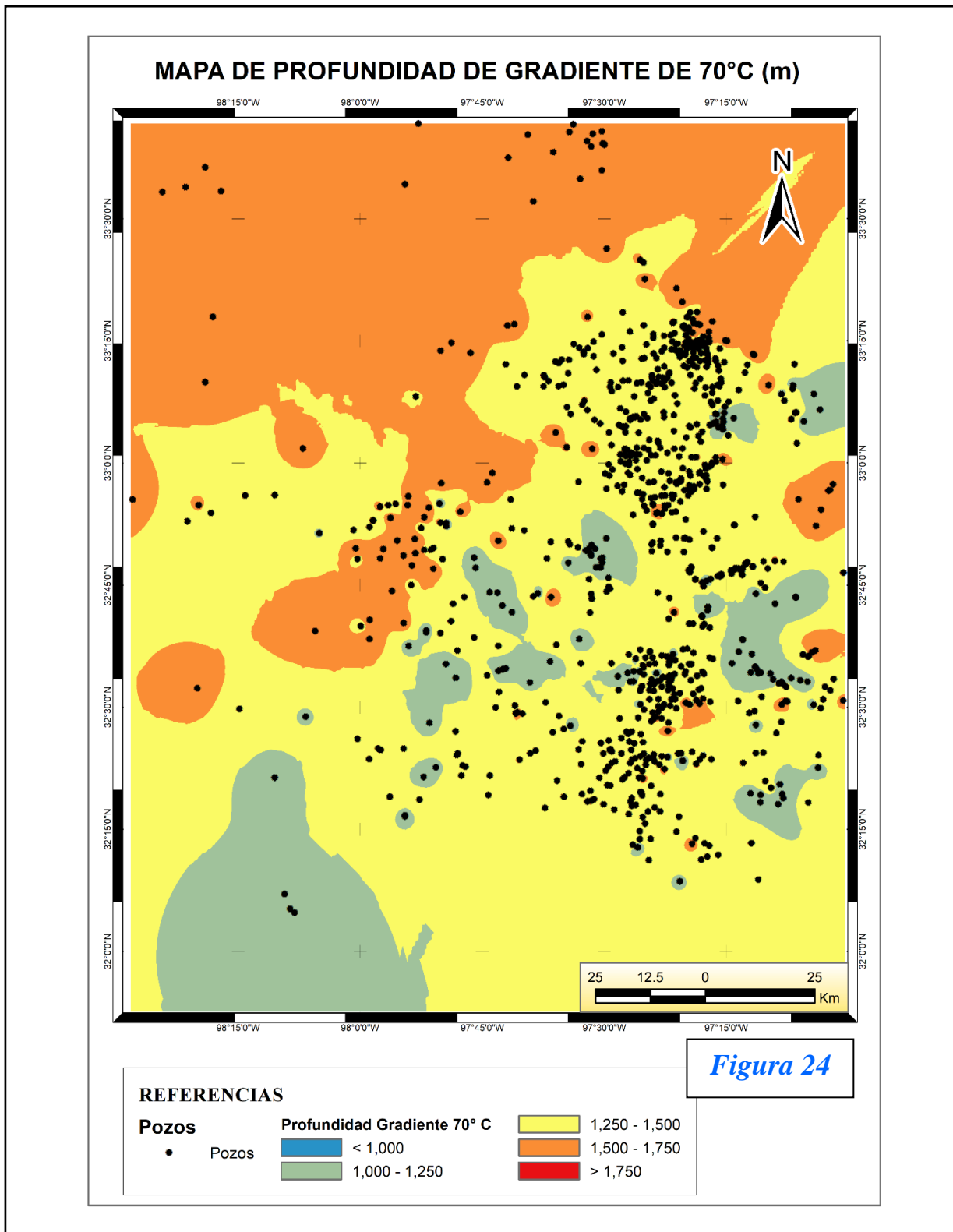


Figura 24. Mapa de Profundidad de isoterma de 70° C: Este mapa representa la profundidad en la cual se puede encontrar temperaturas de 70° C. Estas profundidades varían desde 1000 a mayor de 1750 m encontrándose en mayor proporción en las profundidades que van desde 1250 a 1500 m.

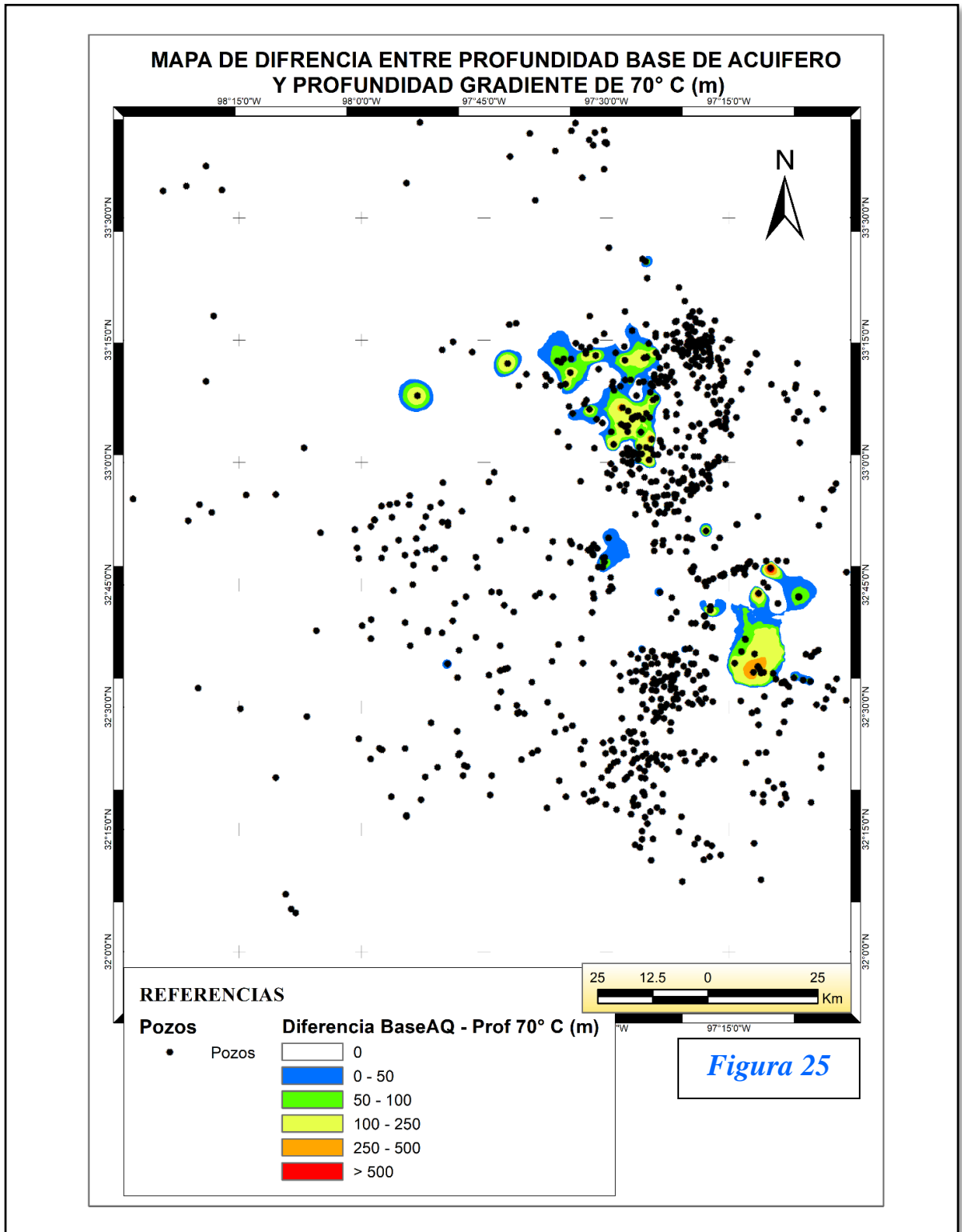


Figura 25. Mapa de diferencia entre la Profundidad de la base del Acuífero y la profundidad de la isoterma de 70° C: Este mapa representa la profundidad en la cual la temperatura es de 70° C coincide con nuestro acuífero. Se puede observar una concentración de estas isotermas de 70° C en el Centro-NorEste del área de interés.

6.2- Mapas binarios resultantes (capa de evidencia) de la reclasificación de los mapas interpolados con sus operadores condicionales correspondientes según la Tabla 4.

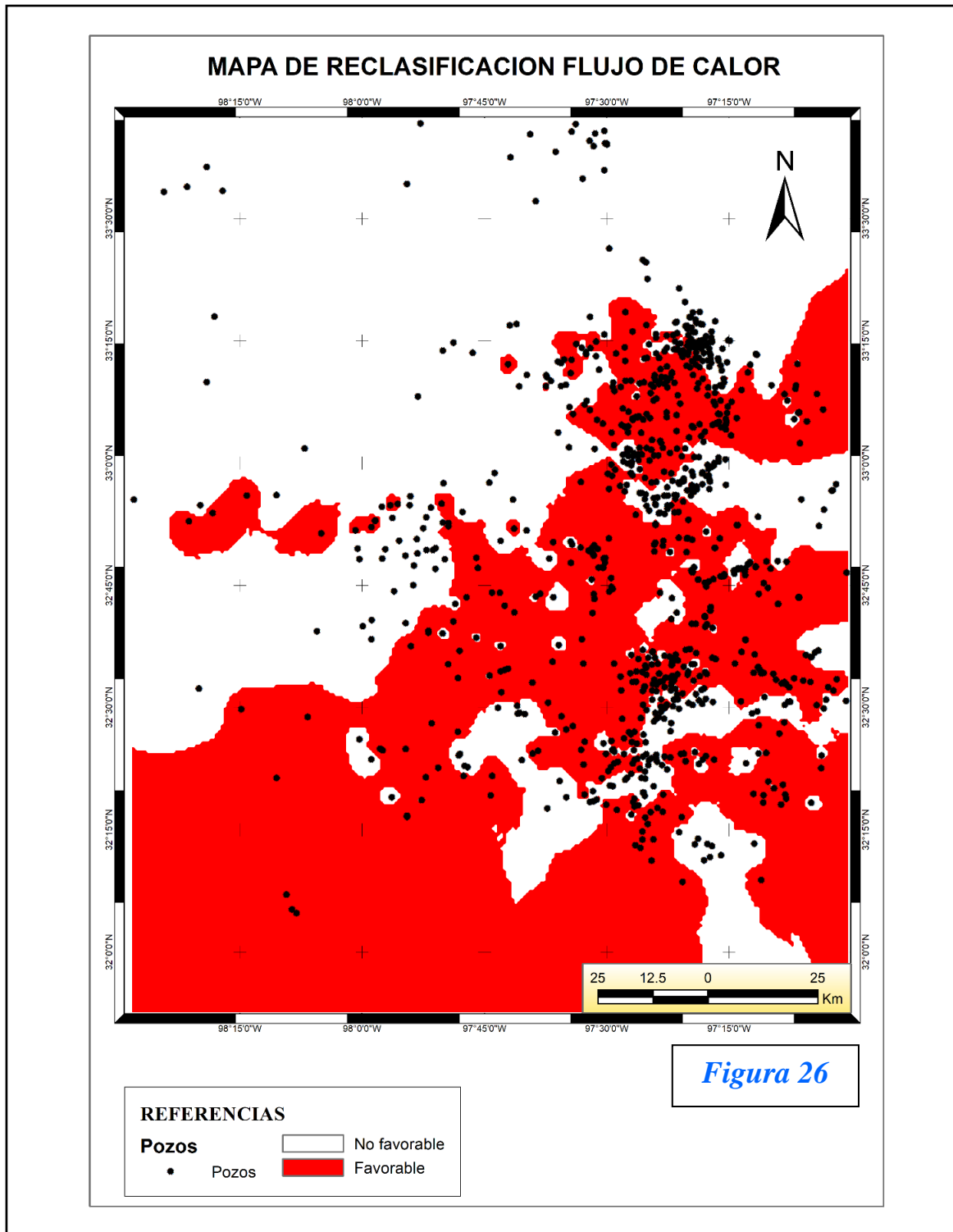


Figura 26. Capa de Evidencia de Flujo de Calor (reclasificación): Aplicados los operadores condicionales de la Tabla 2 al mapa interpolado del Flujo de Calor, se obtiene una capa ráster que muestra las zonas favorables (en rojo) y no favorables (en blanco) en el área.

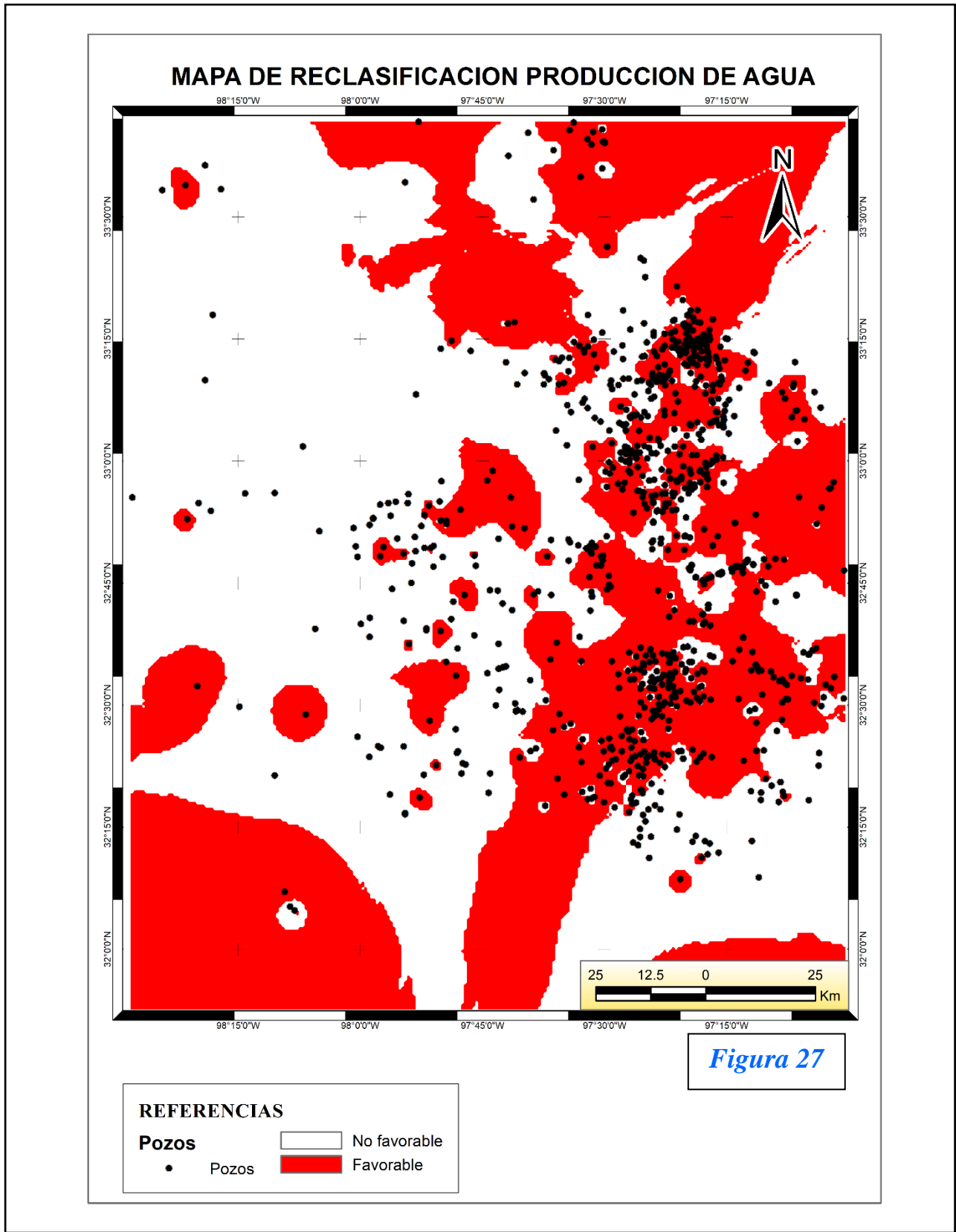


Figura 27. Capa de Evidencia de Volumen de Producción de Agua (reclasificación) que muestra las zonas favorables (en rojo) y no favorables (en blanco).

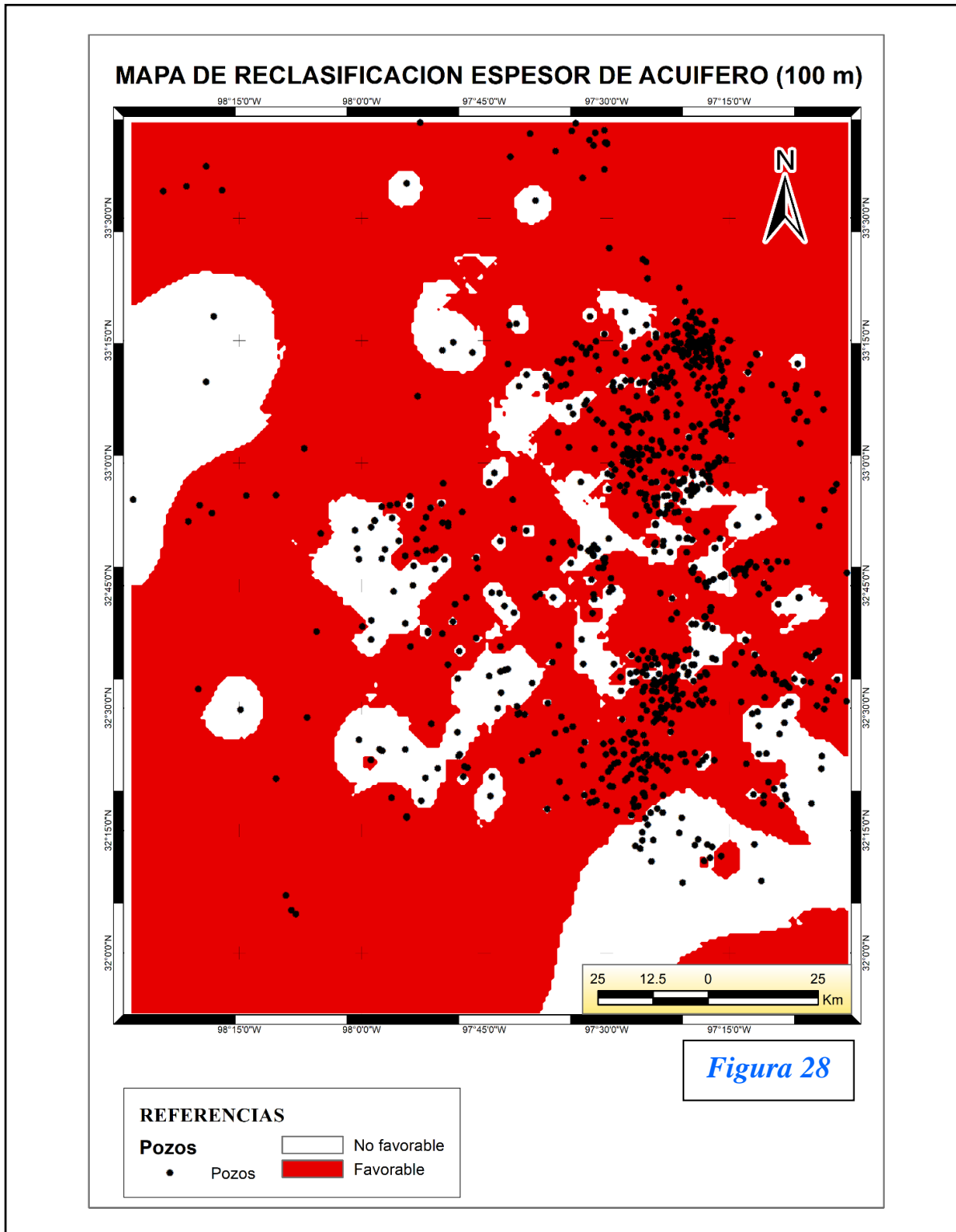


Figura 28. Capa de Evidencia de Espesor de Acuífero (reclasificación): Aplicados los operadores condicionales de la *Tabla 2* al mapa interpolado del Espesor del Acuífero resulta de una capa binaria con zonas **favorables y no favorables** en el área de interés.

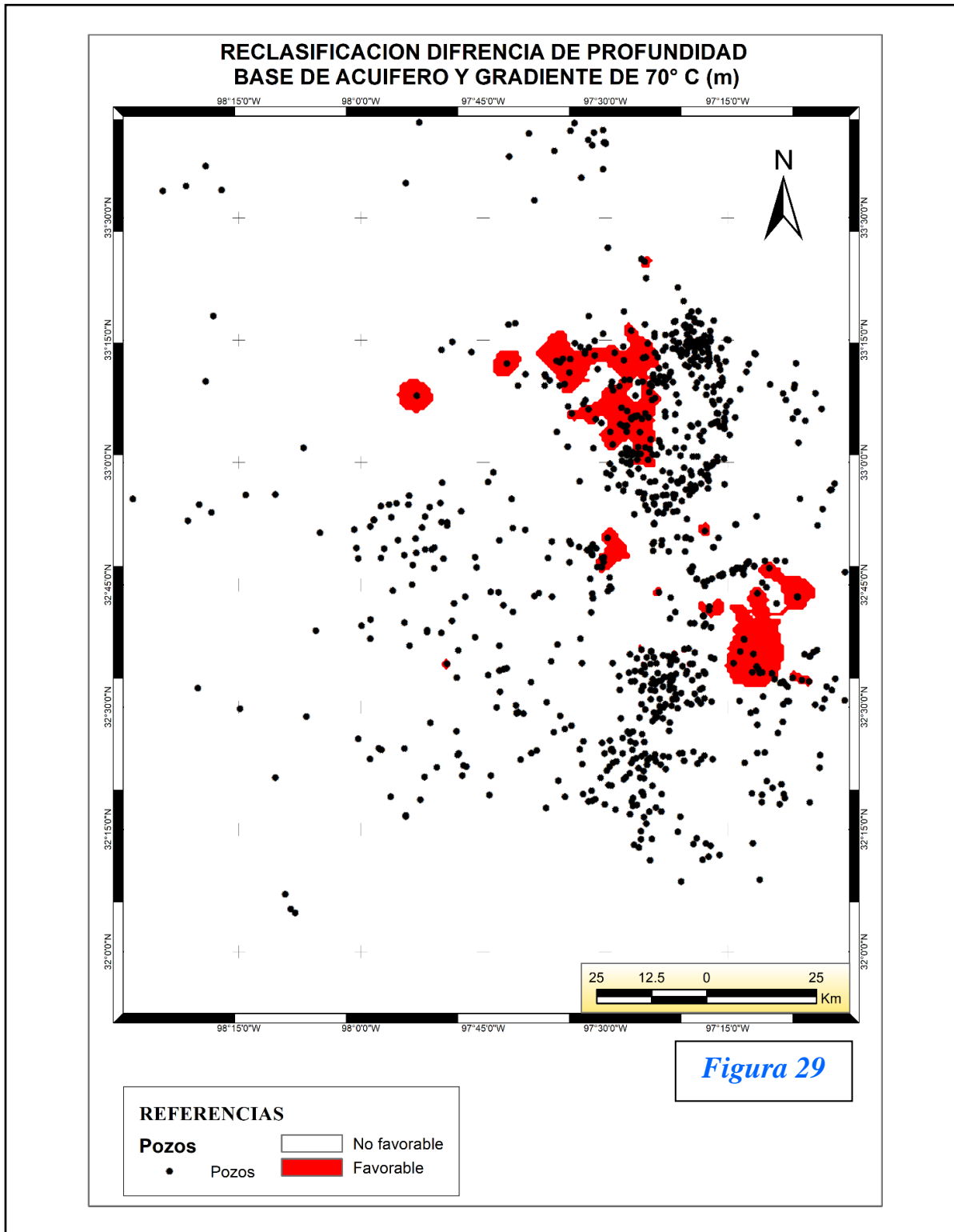


Figura 29. Diferencia de Profundidades (reclasificación): Aplicados los operadores condicionales de la Tabla 2 al mapa de la diferencia de Profundidades, resulta una capa binaria con zonas **favorables** y **no favorables** en el área de interés.

6.3- Mapa Resultado:

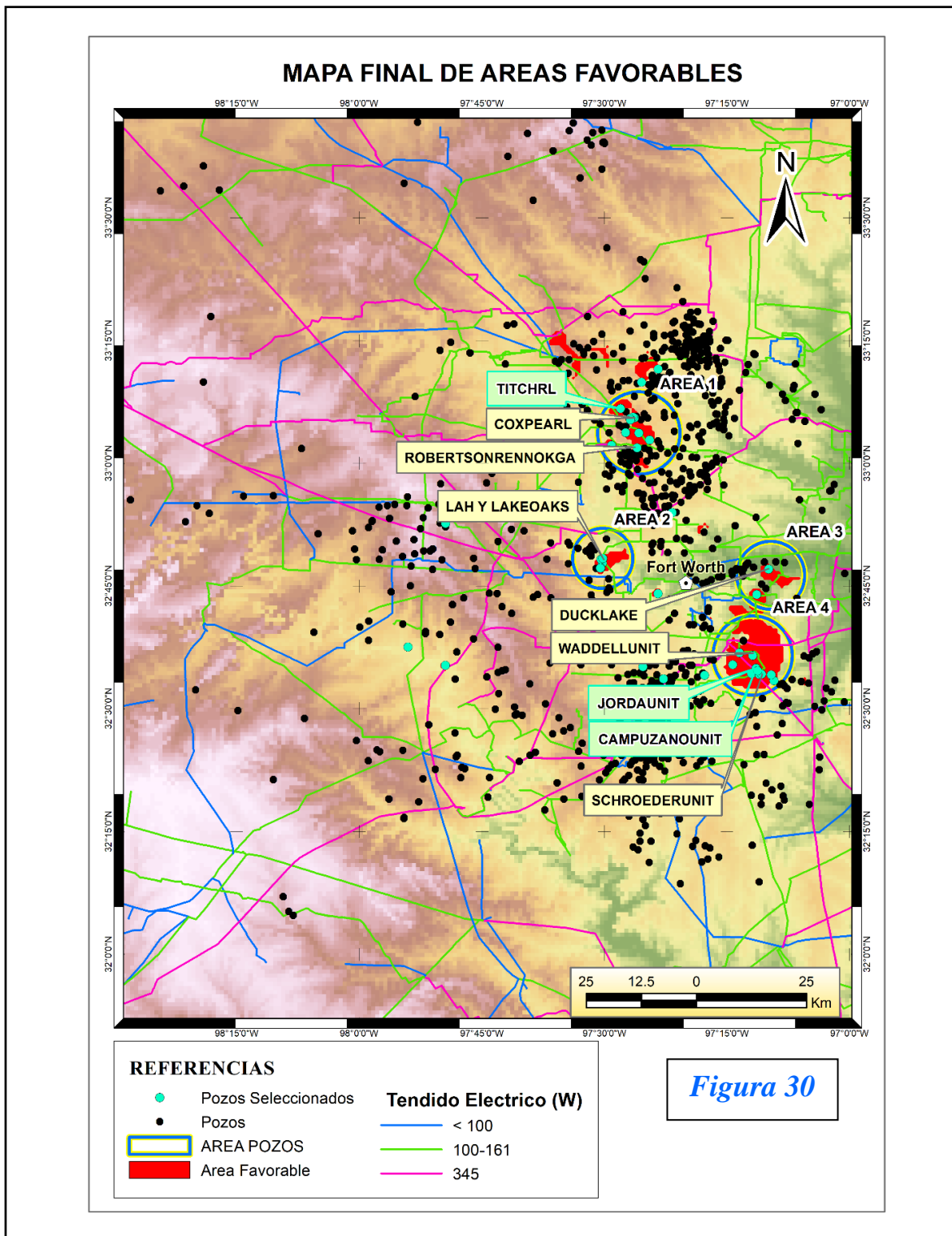


Figura 30. Mapa Final de Áreas Favorables: La combinación de las capas de evidencia binarias, usando operaciones algebraicas (multiplicación) de acuerdo a lo descrito en las *Figuras 16, 18 y 19*, resulta en una *imagen ráster* que permite identificar en **rojo** las superficies de **favorabilidad**, las áreas seleccionadas en **azul** y los **pozos seleccionados** incluidos dentro de las áreas.

DISCUSIÓN

Tomando como referencia las especificaciones técnicas de las plantas de binarias ORC (*ENOGIA* y *ElectraTherm POWER MODULE75*) presentadas en el capítulo de **Utilización de los recursos geotérmicos**, se consideraron, además de las áreas favorables resultantes del análisis espacial de los datos, los pozos contenidos en ellas. Estos pozos fueron revisados con el objetivo de evaluar su potencial energético y discriminar aquellos que serían factibles para su aprovechamiento geotérmico tanto para la generación de energía eléctrica como para su aprovechamiento en usos directos (*Tabla 5*)

Tabla 5: Listado de pozos que interceptan las Áreas Favorables, pozos seleccionados y usos recomendados de los mismos.

POZO	LATITUD	LONGITUD	PROFUNDIDAD POZO (m)	CAUDAL AGUA (lts/seg)	ESPESOR ACUIFERO (m)	TEMPERATURA AGUA °(C)	GRADIENTE °(C)	FLUJO DE CALOR °(C)	Profundidad de Acuífero	USO SUGERIDO
CAINUNIT	32.557	-97.154	2484	1.17	183.79	62.40	49.91	111.29	994.32	
CAMPUZANOUNIT	32.582	-97.190	2923	2.36	244.05	64.89	51.45	114.74	1067.29	ENERGIA ELECTRICA
CHRISTIANUNIT	32.590	-97.238	2369	1.68	366.77	63.90	50.42	112.43	993.59	
COXPEARL	33.093	-97.439	2395	4.14	201.72	52.46	35.91	80.07	1073.32	N/A
DEANUNIT	32.614	-97.224	3044	1.60	161.94	53.88	43.03	95.97	997.98	
DUCKLAKE	32.784	-97.165	2301	4.42	499.63	59.52	33.93	75.66	1019.65	USO DIRECTO
DURANTCUNITA	32.589	-97.824	2398	1.00	464.88	49.39	43.29	96.53	714.97	
FISHER	32.797	-97.504	1995	2.33	185.90	65.20	50.14	111.82	981.97	
FOSTER	32.735	-97.391	2699	5.28	394.66	44.58	31.90	71.15	659.28	N/A
GREENOAKS	32.733	-97.189	2876	2.68	912.02	65.71	46.73	104.22	843.08	N/A
JOHNSONLBESTATE	33.047	-97.408	2291	1.30	1174.55	61.80	36.12	80.55	1052.93	
JORDANUNIT	32.583	-97.191	2739	4.50	172.18	82.92	51.45	114.74	1164.12	ENERGIA ELECTRICA
LAH	32.805	-97.507	1980	2.08	35.66	65.03	39.87	88.91	1061.62	USO DIRECTO
LAKEOAKS	32.806	-97.503	1982	1.21	203.36	53.84	40.06	89.34	984.08	USO DIRECTO
LOWELLMeadows	32.506	-97.426	2168	2.65	374.45	59.18	49.14	109.58	815.19	
MINTCREEKUNIT	32.900	-97.361	2820	3.04	278.89	56.41	44.60	99.46	1065.73	N/A
NEWDawnUNIT	32.571	-97.200	2320	1.66	511.42	66.00	50.32	112.22	1002.55	
NORMANJEGASUNIT	33.063	-97.457	2353	1.23	329.55	45.92	35.56	79.30	909.37	
OAKGROVEUNIT	32.568	-97.295	2256	2.51	371.98	58.72	23.90	53.29	726.95	
PEARLCOX	33.094	-97.441	2378	0.28	239.48	60.60	35.91	80.07	1227.12	
PKTROXELLGU	33.091	-97.447	2380	1.41	247.44	62.43	36.09	80.48	1264.98	
PLUMLEEDONALD	32.878	-97.824	1819	3.05	415.69	53.69	45.24	100.88	740.39	N/A
PRUETTProspectUNIT	33.165	-97.424	2323	1.20	210.22	59.17	36.80	82.06	1179.58	
REGAL-NASH	32.626	-97.901	1558	1.05	230.89	57.41	40.39	90.07	949.33	
REMIINGTONSTATIONUN	32.570	-97.184	3376	0.17	28.80	53.09	50.43	112.47	1065.28	
ROBERTSONRENNOKGA	33.032	-97.433	2266	2.42	317.66	62.05	36.69	81.82	1275.77	USO DIRECTO
ROCKCREEK	32.586	-97.421	2810	5.01	619.05	51.29	48.49	108.14	1062.72	N/A
SCHLUTER	33.062	-97.430	2288	3.86	417.15	46.10	34.01	75.85	856.79	N/A
SCHROEDERUNIT	32.571	-97.179	2365	2.78	465.52	68.84	50.43	112.47	1041.59	USO DIRECTO
SouthernROCHINUNIT	32.569	-97.159	3054	4.15	127.19	54.05	43.12	96.17	1027.60	N/A
STEPHENSBERTHA	33.037	-97.485	2189	1.63	443.03	64.18	38.26	85.32	1248.80	
STRICKLAND	33.192	-97.390	2440	3.18	911.57	43.19	34.63	77.23	624.08	N/A
TAPP'N' GASUNIT	32.787	-97.507	1984	1.02	19.02	66.37	53.84	120.07	1069.85	
TAPPINGASUNIT	32.787	-97.508	1969	0.48	37.67	66.39	53.84	120.07	1061.44	
TEEGARDEN'A`	32.578	-97.188	3129	0.68	20.67	52.84	51.45	114.74	1056.31	
TITCHRL	33.112	-97.467	2341	3.17	413.49	65.16	35.40	78.93	1260.04	ENERGIA ELECTRICA
TLH	32.561	-97.380	2154	1.02	531.27	55.37	46.52	103.73	1074.42	
TLHB	32.561	-97.379	2993	0.83	52.03	61.20	46.52	103.73	1118.86	
TROXELLPKGU	33.089	-97.447	2376	0.27	203.09	57.45	36.09	80.48	1174.09	
WADDELLUNIT	32.609	-97.197	2390	3.26	52.67	63.26	50.85	113.40	1024.40	USO DIRECTO

Hoy en día, las plantas binarias representan el 47 % del número de unidades geotérmicas que operan en todo el mundo y proporcionan el 14 % de la capacidad geotérmica. La capacidad relativamente baja de las plantas binarias es indicativa de que estas plantas utilizan recursos de menor temperatura y menor entalpía, lo que da como resultado la operación de centrales eléctricas más pequeñas.

Existen dos sectores donde la instalación de una planta de ORC para generación eléctrica sería posible (en color verde en la tabla). La primera área considerada está integrada por dos pozos (JORDAUNIT y CAMPUZANOUNIT) los que, asociados, podrían ser propicios para la producción de energía eléctrica. La distancia entre ellos es cercana a los 35 m y, sumados, poseen un caudal de agua de 6.9 l/s (litros/segundo). La temperatura promedio es de 74°C encontrándose el acuífero productor a una profundidad de 1067 m, pudiendo generar hasta 75kWe, con temperaturas de entrada de 65 a 132°C y rango de caudales que van desde los 3 a 23 l/s, suficiente para el autoabastecimiento de una planta industrial.

El segundo sector es donde se ubica el pozo TITCHRL el cual se ajusta a las características técnicas de la planta ORC binaria *ElectraTherm*, con temperatura de entrada de 65.16 °C y 3.17 l/s de caudal requerido.

Un caso de éxito a mencionar es la instalación y operación de un sistema híbrido que estuvo en funcionamiento varios meses está ubicado en Texas por parte del *Pozo Pleasant Bayou, en Brazoria County*, que fue capaz de alimentar una central híbrida de ciclo binario/gas para generación de electricidad de 1 MW desde abril de 1988 hasta agosto de 1990, produciendo 1.9 millones de m³ de salmuera y 6500 m³ de gas. La vida útil del pozo se evaluó en 5 años de extracción a razón de 3000 m³ de salmuera/año (John, et al., 1998). Esta prueba demostró la viabilidad técnica de la producción de energía eléctrica a partir de yacimientos geopresurizados. El sistema utilizó la energía geotérmica del calor y el gas de los fluidos del pozo, así como el calor de escape de los generadores del motor de gas que utilizan el gas producido como combustible. (John et.al., 1998)

Otro caso de éxito fue el pozo *Gladys McCall #1* ubicado en un área pantanosa en *Cameron Parish, Louisiana*. Este pozo fue probado durante el período de tiempo más largo (4 años), desde 1983 a 1987. Durante este periodo el pozo produjo más de 4.3 millones m³ de salmuera y 18.9 millones de m³ de gas. La salmuera fue reinyectada posteriormente al acuífero.

Del resto de los pozos seleccionados la gran mayoría no alcanzan a llegar a los 65°C de temperatura mínima requerida para la generación de energía eléctrica. Sin embargo, existen algunos que poseen agua a temperaturas mayores que 65 °C pero que su caudal no llega a ser suficiente como para ser utilizados para la generación eléctrica. Si bien están ubicados dentro de las áreas Favorables solo podrían ser utilizados para climatización u otros usos directos los que se proponen más adelante *a modo de ejercicio*.

En la **Tabla 5** se muestran los pozos seleccionados. **Verde:** los pozos propicios para la generación eléctrica, **Naranja:** Pozos para Usos Directos, con buenas temperaturas, pero poco caudal y **Azul:** aquellos pozos que, a pesar de tener buenos caudales, la temperatura es demasiado baja como para ser tomados en cuenta. En **Blanco** aquellos pozos que poseen muy bajos caudales y/o temperaturas.

Tomando en cuenta que la ciudad de *Fort Worth* es una de las mayores procesadoras de productos de res y cerdo en Texas y que, además, es uno de los grandes productores de aves de corral y sus productos derivados en todo los Estados Unidos, la energía geotérmica producida podría ser aprovechable tanto para el uso en cascada como para usos directos a saber:

Uso en Cascada: Cubrir la necesidad de energía para la climatización de lugares destinados a la cría avícola y conservación de huevos, mediante la utilización de bombas de calor. Esto permite crear condiciones de temperatura, humedad y limpieza del aire adecuadas que derivan en la comodidad y la calidad del aire interior. El objetivo final es proveer condiciones fijas para la manipulación o mejora de la calidad del producto final. (*Figura 31*)

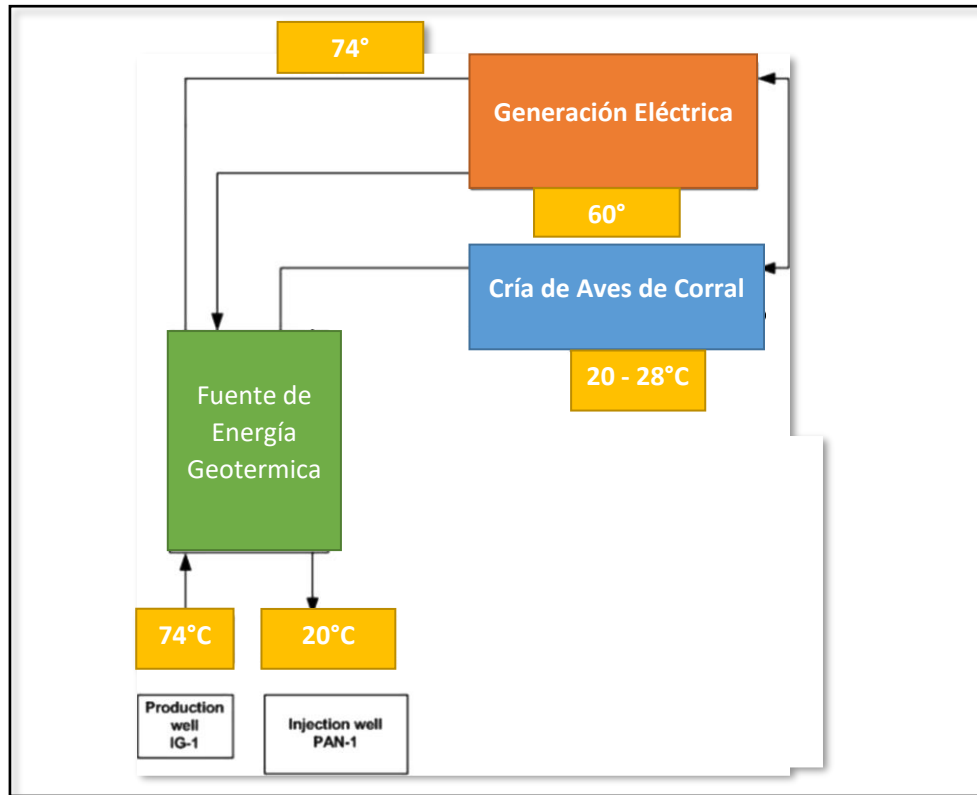


Figura 31: Diagrama de aprovechamiento de la energía geotérmica en Uso en Cascada.

El requerimiento de temperatura para estas bombas de calor es $<50^{\circ}\text{C}$.

En una granja de cría avícola en Estados Unidos se realizó un estudio económico comparando distintos métodos de calefacción para un mismo periodo de tiempo (**Figura 32**). Al observar los resultados, donde el período de recuperación es de solo unos pocos meses, se deduce que, usar agua geotérmica directamente para fines de calefacción, resulta tentador para reducir los costos del alto consumo de combustible. Esto significa que los agricultores podrían adoptar este método, aunque el costo inicial puede ser alto en principio, ya que este costo se verá compensado por los grandes ahorros de este método. (Mamdoh, et.al., 2014)

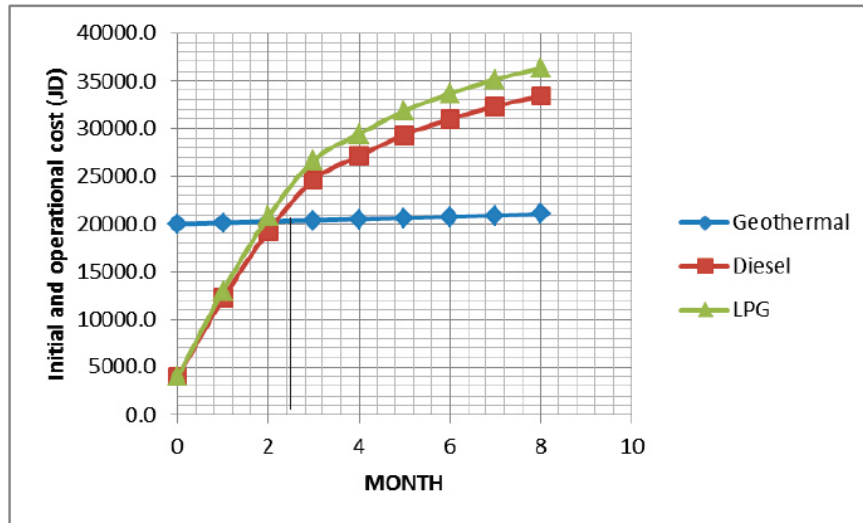


Figura 32: Comparación de distintos métodos de calefacción vs cash Flow en un periodo de 9 meses. Tomado de Mamdoh, et.al. 2014

Temperatura: El mejor rango de temperatura interior para pollos adultos se encuentra en (20-24) °C para aves adultas.

Especificaciones estándar de la nave avícola:

Longitud =40 m. Ancho = 12 m. Altura =2,5 m.

Que tenga un área de ventilación de aire alrededor del 6% del área del suelo de la nave y que tenga dos puertas de acero (2 m x 2,5 m).

Con respecto al **Uso Directo** para sectores donde la temperatura no alcanza el mínimo requerido para la generación de energía eléctrica, se propone el aprovechamiento mediante la implementación de un sistema geotérmico superficial de un establo de vacas destinado a la ganadería lechera, donde las necesidades energéticas y el uso de agua de los establos lecheros muestra que se requiere una aplicación adecuada del calor geotérmico, tanto para la climatización de los establos como para mejorar el intercambio térmico directo entre la leche y el agua.

Un estudio basado en la granja “Montagnini” en la región de Emilia-Romaña (Italia) evalúa la eficiencia de la geotermia de baja temperatura en proporcionar enfriamiento de leche y calentamiento contemporáneo de agua para las necesidades del ganado, El principio de este trabajo es que, por medio del libre intercambio de calor mejorado por el HHE (intercambiador de calor helicoidal) colocado dentro de un UWT (*Under Water Tank*), el sistema calentará el agua y enfriará la leche en cada ordeño operado en el establo. (Strpic’ et al., 2020)

Cabe mencionar que, en la estación más cálida, la localidad de *Fort Worth* alcanza los 37 °C de temperatura lo que hace necesario implementar usos de energía para el control del microclima, capaces de mitigar el estrés por calor, que representa una seria amenaza para el bienestar de las vacas y la producción de leche. De hecho, el estrés por calor afecta el comportamiento de las vacas, la producción de leche, la calidad de la leche y la tasa de concepción. Las soluciones técnicas adoptadas mayoritariamente en los establos abiertos hacen uso de múltiples sistemas, como pantallas de sombra móviles y ventiladores combinados con empapadores de agua. En cambio, en el período más frío, la energía para la calefacción de establos se refiere a la producción de agua caliente para limpiar y desinfectar el sistema de ordeño y los tanques.

Además, es aconsejable un ligero calentamiento del agua de bebida, especialmente en los días fríos, para estimular la ingesta de agua y mejorar la producción de leche. (*Figura 33*)

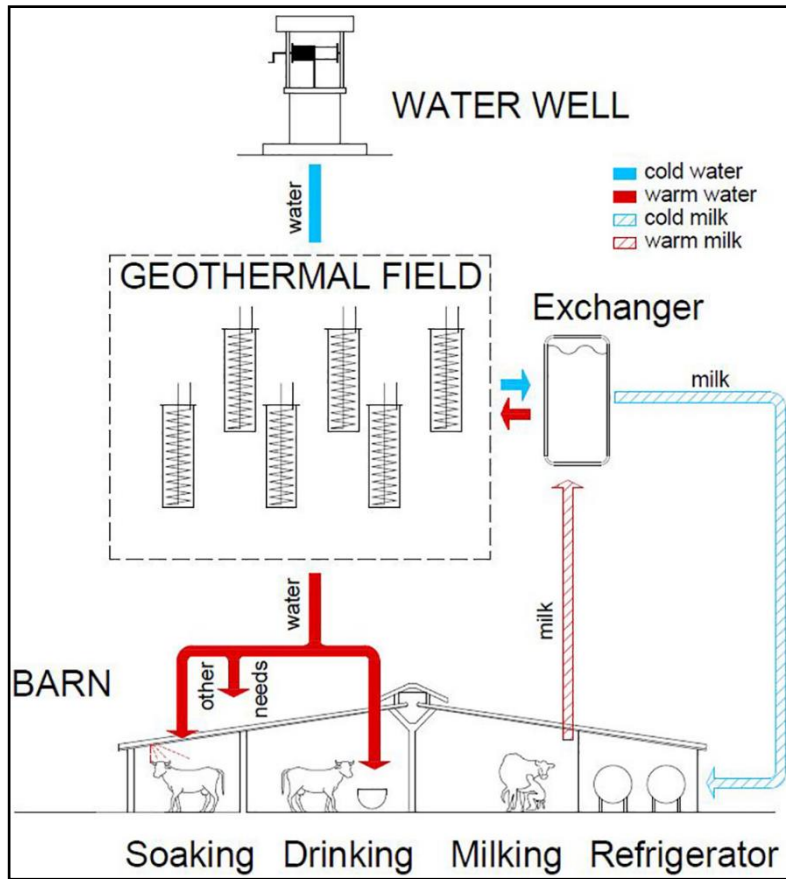


Figura 33: Esquema operativo simplificado que muestra un sistema de tres partes: granero, refrigerador de leche y el campo geotérmico, tomado de K. Strpic´ et al., 2020

Otras consideraciones de Usos y oportunidades: La existencia de domos salinos en Texas y su relación con salmueras geotérmicas de baja temperatura, llevan a considerar un área de oportunidad el desarrollo de la minería de dichas salmueras. Estas son portadoras de minerales como hierro, magnesio, calcio, sodio y litio.

El *Litio* es un recurso que ha recibido una atención significativa recientemente, especialmente en regiones con alto contenido de litio en salmueras geotérmicas. Actualmente, el litio se produce principalmente en minas de roca dura en Australia o en depósitos de salmuera subterráneos en Chile y Argentina. Sin embargo, la extracción de litio de la salmuera geotérmica aún se encuentra en una fase incipiente. La mayoría de los esfuerzos, especialmente en los EE. UU., Alemania y Nueva Zelanda, se centran en una técnica llamada Extracción directa de litio ("DLE"), con alrededor de 60 variantes diferentes de esa tecnología. Muchas empresas de petróleo y gas, geotérmicas y mineras están evaluando la producción de litio a partir de sus activos, ya sea como subproducto o como producto principal (Richter, 2021a)

7- CONCLUSIONES

- El Método Booleano y sus combinaciones representan un enfoque práctico y de fácil aplicación en los Sistemas de Información Geográfica, ya que ofrecen una primera aproximación en el análisis espacial de datos, como ocurre en el presente estudio, mediante la combinación de capas de evidencias a través de operadores lógicos o algebraicos.
- El análisis multicriterio debe ir acompañado de un análisis exhaustivo del pozo y sus alrededores, ya que la conversión es un proyecto técnico complejo que requiere integridad del pozo, temperatura estable, tasa de producción suficiente y uso potencial del calor cercano para planificar más exploraciones detalladas, y para expandir los límites del campo conocido que se está explotando.
- En el Sector de Estudio se pudieron identificar **4 Áreas Favorables**, 2 de ellas contienen pozos petroleros factibles de ser re-utilizados para la producción de energía **eléctrica** (pozos TITCHRL, JORDAUNIT y CAMPUZANOUNIT) y las restantes para **usos directos** (pozos DUCKLANE, LAH, LAKEOAKS, ROBERTSONRENNOKGA, SCHROEDERUNIT y WADDELLUNIT).
- La evaluación de los caudales de producción de agua, espesores de los acuíferos y temperaturas de gradientes de subsuelo tomado de los datos de pozos, dentro de las áreas favorables, permitió efectuar una primera aproximación del potencial energético del sector, teniendo en cuenta la configuración de una planta binaria. Esta valoración podría llevarse a un estudio de mayor detalle en una etapa posterior.
- *Cabe destacar que, de las bases de datos consideradas para el presente trabajo, **ninguna** de ellas posee registros de presión de pozo, dato que podría utilizarse como una herramienta para la estimación del gasto de agua descargada, sumando información para el procesamiento de los datos y por ende aportando más elementos para sustentar el resultado de dicho proceso.*
- Al no tener datos de *presión*, los cuales son inexistentes en las bases de datos tomadas para el presente trabajo, no se pudo realizar la estimación del gasto de agua descargada en el sistema, dato que aportaría otro elemento para sustentar los resultados obtenidos.
- Es posible la instalación de una Planta Binaria ORA ENOGIA y *ElectraTherm* POWER MODULE75 en la zona 1 para producir 75 kWe, ya que admite una temperatura de entrada de 70 a 120°C y un caudal de 3 a 23 l/s.
- Los campos de hidrocarburos en explotación y en desarrollo, poseen un alto potencial de recurso geotérmico almacenado bajo Texas lo que permite un rápido aprovechamiento del mismo para producción eléctrica y/o para Usos Directos.
- Se propone la utilización de **Uso En Cascada** para la planta generadora de energía eléctrica y de **Uso Directo** para sectores donde la temperatura no alcance el mínimo requerido para la generación de energía eléctrica.

BIBLIOGRAFÍA

AMBRÍZ-DÍAZ, V.M.; RUBIO-MAYA, C.; PACHECO-IBARRA, J.J.; PASTOR-MARTÍNEZ, E.; A (2019). “Análisis exergético convencional aplicado a una planta de poligeneración operando en cascada geotérmica”. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 03, 1-10, 01, 07, 019.

<https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n3.035>

BHATTACHARYA S., BOUL P., DEETJEN T., GEE I, GLAZER Y., HAND M., KIM J., MOSS, J. RHODEN D., RICHARDS M., WU K. (2022): “The Future of Geothermal in Texas: Contemporary Prospects and Perspectives. The Coming Century of Growth & Prosperity in The Lone Star State”. Mitchel Foundation Report, <https://energy.utexas.edu/research/geothermal-texas>

BLACKWELL D., MOERCHEN F., CUTRIGHT B, GOSNOLD W, KAY M., NAGIHARA S., ROBINSON C. AND TESTER J., (2011) “Data Integration into the National Geothermal Data System (NGDS)”. *Geothermal Resources Transactions*, Vol. 35, pp. 1539-1543.

BONHAM-CARTER G. F. (1994) “Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS. *Computer Methods in the Geosciences*”, vol. 13, Pergamon, Pergamon, New York.

BRUNER, K. R., & SMOSNA, R. A. (2011) “A comparative study of the Mississippian Barnett shale, Fort Worth basin, and Devonian Marcellus shale, Appalachian basin” (NETL-2011/1478, 2011). US Department of Energy.

CARRANZA EJM, WIBOWO H, BARRITT SD, SUMINTADIREJA P. (2008) “Spatial data analysis and integration for regional-scale geothermal mapping, West Java, Indonesia”. *Geothermics*. 2008; 3:267–99.

DIAMOND J. y BARRO J. (2021) “Investing in Texas: 21st Century Energy Capital of the World” Center of Public Finance, Rice University/ Baker Institute for Public Policy. bakerinstitute.org Commissioned by Texas 2036. Pp25. <https://texas2036.org/>

DIPIPO, R., (1995) “Geothermal Electric Power Production in the United States: A Survey and Update for 1990_1994,” *Proc. 1995 World Geothermal Congress, Int’l. Geothermal Assn., Vol. 1, 1995, pp. 353_362.*

EGAN M., (2021) “Texas produce más energía que cualquier otro estado, pero sufrió un apagón de todos modos”. <https://cnnespanol.cnn.com/2021/02/17/texas-produce-mas-energia-que-cualquier-estado-apagon/>.

IRENA and IGA, (2023). “Global geothermal market and technology assessment”, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi; International Geothermal Association, The Hague. <https://www.irena.org/Publications/2023/Feb/Global-geothermal-market-and-technology-assessment>

JOHN, C. J., MACIASZ, G., & HARDER, B. J. (1998). “Gulf Coast geopressured-geothermal program summary report compilation. Volume 2-B: Resource description, program history, wells tested, university and company-based research, site restoration” (No. DOE/ ID/13366-T1-Vol. 2B). Louisiana State Univ., Basin Research Inst., Baton Rouge, LA

KAPUSTA, S., LIVESCU S., DINDORUK, B., SCHULZ, R., WEBBER, M. (2022): Direct Use Applications: Decarbonization of Industrial Processes, and Heating and Cooling Scenarios. Chapter 2, Mitchel Foundation Report.

LIVESCU S., DINDORUK, B., WEBBER M. (2022). “Other Geothermal Concepts with Unique Applications in Texas. In The Future of Geothermal in Texas THE COMING CENTURY OF GROWTH & PROSPERITY IN THE LONE STAR STATE”. Cap 7.

LUND, J. W., & TOTH, A. N. (2021). “Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review”. *Geothermics*, 90, 101915.

MADHAWA HETTIARACHCHI, H.D.; GOLUBOVIC, M.; WOREK, W.M.; IKEGAMI, Y. (2007) “Optimum design criteria for an Organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources”. *Energy* 2007, 32, 1698–1706.

MAMDOH, A.B. y MUTAZ E. (2014) “Utilization of Geothermal Energy in Poultry Farming” *Journal of Energy Technologies and Policy*. ISSN 2224-3232 (Paper) ISSN 2225-0573 (Online) Vol.4, No.10.

MOGHADDAM, M. K., SAMADZADEGAN, F., NOOROLLAHI, Y., SHARIFI, M. A. and ITOI, R. (2014) “Spatial analysis and multi-criteria decision making for regional-scale geothermal favorability map,” *Geothermics*, vol. 50, pp. 189–201, 2014.

NOOROLLAHI Y, ITOI R, FUJII H, TANAKA T. (2007) “Geothermal resources exploration and wellsite selection with environmental consideration using GIS in Sabalan geothermal area, Iran”. In: 32nd workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford University; SGP-TR-183.

NOOROLLAHI, Y; ITOI R.; FUJII, H.; TANAKA, T. (2008) “GIS integration model for geothermal exploration and well siting”. *Geothermics* 37 (2008) 107–131.

OLDENBURG, C., PAN, L., MUIR, M., EASTMAN, A., & HIGGINS, B. S. (2019). “Numerical simulation of critical factors controlling heat extraction from geothermal systems using a closed-loop heat exchange method”.

PILKO, R. M., HART-WAGONER, N. R., HORN, A. J. V., & SCHERER, J. A. (2021). “Repurposing Oil & Gas Wells and Drilling Operations for Geothermal Energy Production”. In *Offshore Technology Conference*, Houston, TX, USA. OnePetro.

PROL-LEDESMA, RM. (2000). ‘Evaluation of the reconnaissance results in geothermal exploration using GIS’. *Geothermics*, vol. 29, No. 1, pp 83-103.

RATNAKAR, R., DINDORUK, B., LIVESCU, S., & GAUTAM, S. (2022). “A Comparative Study of the Impact of the CO₂ Properties on the Thermal Output of a Geothermal Well”. In *SPE Improved Oil Recovery (IOR) Conference*, Tulsa, OK, USA. Onepetro.

RICHTER, A. (2021a). “Geothermal lithium, its extraction and impact on clean energy”. Retrieved December 14, 2022, from <https://www.thinkgeoenergy.com/geothermal-lithium-its-extraction-and-impact-on-clean-energy/>.

RUBIO, C., AMBRÍZ, V.M., PASTOR, E., BELMAN, J.M. (2105). “Cascade utilization of low and medium enthalpy geothermal resources- A review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 689-716.

RUZO A., BLACKWELL D. & RICHARDS M. (2009) “Where the Barnett Ends—A Study of the Geothermal Potential in Dallas County, Texas. *Geothermal Resources Transactions*”, Vol. 33, pp. 959-966.

STRPIC´ K., BARBARESI A., TINTI F., BOVO M., BENNI S., TORREGGIANI D., MACINI P., TASSINARI P. 2020. “Application of ground heat exchangers in cow barns to enhance milk cooling and water heating and storage” *Energy & Buildings*

THINKGEOENERGY (2021A), “Geothermal energy production & utilization” www.ThinkGeoEnergy.com/geothermal/geothermal-energy-production-utilisation/

TROTA, A, FERREIRA, P, GOMES, L, CABRAL, J & KALLBERG, P. “Power Production Estimates from Geothermal Resources by Means of Small-Size Compact Climeon Heat Power Converters: Case Studies from Portugal” (Sete Cidades, Azores and Longroiva Spa, Mainland) 23 July 2019. *Energies*.

TRUMPY, E., DONATO, A., GIANELLI, G., GOLLA, G., MINISSALE, A., MONTANARI, D., SANTILANO, A., and MANZELLA, A. (2015). “Data integration and favorability maps for exploring geothermal systems in Sicily, southern Italy”. *Geothermics*, vol. 56. pp. 1–16, 2015

WANG, S; YAN, J.; LI, F; HU, J y LI, K (2016): “Exploitation and Utilization of Oilfield Geothermal Resources in China”. *Energies* 2016, 9, 798; doi:10.3390/en9100798

YOUSEFI H, NOOROLLAHI Y, EHARA S, ITOI R, YOUSEFI A, FUJIMITSU Y. “Developing the geothermal resources map of Iran”. *Geothermics* 2010; 39:140–51.

ZAFAR D., CUTRIGHT B. (2014). “Texas’ geothermal resource base: A raster-integration method for estimating in-place geothermal-energy resources using ArcGIS”. *Geothermics* vol. 50 pp.148–154