



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE LA TIERRA
Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy

"Aplicación del Método Analítico para la Estimación del Potencial Teórico Geotérmico del Noroeste de México, (Baja California, Baja California Sur, Sonora y Sinaloa)".

**Tesis para obtener
El grado de maestro en**

Geociencias y Planificación del Territorio

**Presenta
Ing. Diego Armando Martínez Ruiz**

Director: Dr. Orlando Miguel Espinoza Ojeda

Morelia, Mich. Julio 2025

Comité

Director de tesis: Dr. Orlando Miguel Espinoza Ojeda

Sinodales: Dra. Erna Martha López Granados

Dra. Martha Gabriela Gómez Vasconcelos

Dra. Ana Teresa Mendoza Rosas

Dr. Emmanuel Olvera García

Dr. Ángel Gregorio Figueroa Soto

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al SECIHTI (secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación) por haberme otorgado la beca que hizo posible el desarrollo de esta investigación. Gracias a este apoyo económico, pude dedicarme por completo a mi proyecto académico y de investigación, lo cual fue esencial para la culminación de esta tesis.

Agradezco profundamente a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y al Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría, los cuales han sido clave para alcanzar una de mis metas más importantes y han contribuido a mi crecimiento profesional.

Mi agradecimiento también va para mi asesor, el Dr. Orlando, por su paciencia y orientación durante todo el proceso de investigación, siempre ayudándome a resolver mis dudas de manera profesional.

Estoy igualmente agradecido con Giovanni Razo, quien me motivó a continuar con mis estudios de posgrado y me brindó su apoyo en los momentos más difíciles, cuando la incertidumbre me invadía.

A mis compañeros de maestría, Jamy, Diana, Tzeltzin, Juárez y Oscar, les agradezco profundamente por su apoyo constante cuando surgían dudas y por hacer los días de trabajo en la sala de estudio mucho más llevaderos con sus amenas pláticas y su excelente convivencia.

Dedicatoria

Me dedico este trabajo a mí mismo, ya que, aunque al principio parecía un gran reto sin saber por dónde comenzar, con el apoyo de mi asesor y los profesores de las materias complementarias, pude avanzar y llevar el proyecto a cabo. A lo largo de este proceso, me di cuenta de que no solo fue un logro académico, sino también un crecimiento personal. Puedo decir con orgullo que he alcanzado una meta más en mi vida.

INDICE

Comité	2
Agradecimientos.....	3
Dedicatoria	4
Índice de figuras	7
Resumen.....	9
Abstract.....	10
Capítulo 1	11
1.1 introducción	11
1.2 planteamiento del problema	11
Justificación.....	12
1.3 Hipótesis	12
1.4 Objetivos	13
Objetivo general	13
1.4.1 Objetivos particulares.....	13
Capítulo 2	13
Antecedentes	13
Antecedentes en México	17
Capítulo 3	20
Marco teórico.....	20
Capítulo 4	24
Áreas de Estudio.....	24

4.1 Baja California	26
4.2 Baja California Sur	28
4.3 Sonora	31
4.4 Sinaloa	33
Capítulo 5	36
Metodología.....	36
Capítulo 6	37
Resultados y Discusiones.....	37
Interpretaciones y Discusiones	85
Capítulo 7	87
Conclusiones	87
Referencias Bibliográficas	88

Índice de figuras

FIGURA 1 . MAPA DE UBICACIÓN DE LOS SITIOS CONSIDERADOS PARA ESTIMAR EL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE DISTINTAS ZONAS DE ESTUDIO DENTRO DE LA PENÍNSULA DE BAJA CALIFORNIA, Y LOS ESTADOS DE SONORA Y DE SINALOA. DATOS OBTENIDOS DE ESPINOZA-OJEDA ET AL (2023).	25
FIGURA 2. MAPA GEOLÓGICO DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA (CREADO CON DATOS OBTENIDOS DE INEGI Y EDITADOS EN QGIS).	27
FIGURA 3. MAPA GEOLÓGICO DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA SUR, DATOS OBTENIDOS A TRAVÉS DE INEGI Y EDITADOS EN QGIS	30
FIGURA 4. MAPA GEOLÓGICO DE SONORA (CREADO A TRAVÉS DE DATOS DE INEGI Y EDITADOS EN QGIS).	32
FIGURA 5. MAPA GEOLÓGICO DEL ESTADO DE SINALOA , DATOS OBTENIDOS DE INEGI Y EDITADOS EN QGIS.	35
FIGURA 6. MAPA DE SITIOS DE FLUJO DE CALOR DE MÉXICO , CONSTITUIDOS POR LOS ESTADOS DE LA PENÍNSULA DE BAJA CALIFORNIA , SONORA Y SINALOA	42
FIGURA 7. MAPA DE ILUSTRACIÓN DE ZONAS DE ESTUDIO DENTRO DE LOS ESTADOS DE LA PENÍNSULA DE BAJA CALIFORNIA, SONORA Y SINALOA.	45
FIGURA 8. MAPA DE LOS SITIOS ANALIZADOS (CÍRCULO ROJO) Y DE LOS PUNTOS DE VALORES PROMEDIO DEL ESPESOR DEL BASAMENTO (CIRCULO GRIS).	45
FIGURA 9. MAPA DEL GRADIENTE DE BOUGER(MGAL), INCLUYENDO LOS SITIOS DE ESTUDIO.	46
FIGURA 10. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL CAMBIO DE TEMPERATURAS CON RESPECTO A LA PROFUNDIDAD EN LA ZONA BC-1 DE BAJA CALIFORNIA.	51
FIGURA 11. PERFILES DE TEMPERATURAS DE LOS SITIOS CORRESPONDIENTES A LA ZONA BC-2 DE BAJA CALIFORNIA.	51
FIGURA 12. PERFIL DE TEMPERATURAS DE LA ZONA BCS-1 DE BAJA CALIFORNIA SUR.	52
FIGURA 13. PERFIL DE TEMPERATURAS DE LA ZONA BCS-2 DE BAJA CALIFORNIA SUR.	53
FIGURA 14. PERFIL DE TEMPERATURAS DE LA ZONA BCS-3, PERTENECIENTE AL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA SUR.	53
FIGURA 15. PERFIL DE TEMPERATURAS DE LA ZONA SON-1 DEL ESTADO DE SONORA.	54
FIGURA 16. PERFIL DE TEMPERATURAS DE LA ZONA SON-4 DEL ESTADO DE SONORA.	54
FIGURA 17. PERFIL DE TEMPERATURAS DE LOS SITIOS PERTENECIENTES A LA ZONA SIN-1 DEL ESTADO DE SINALOA.	55
FIGURA 18. MAPA KRIGING DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA A 1KM DE PROFUNDIDAD.	63
FIGURA 19. MAPA DE INTERPOLACIÓN DE LAS TEMPERATURAS A 3KM DE PROFUNDIDAD.	64
FIGURA 20. MAPA KRIGING DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA A 10KM DE PROFUNDIDAD.	67

FIGURA 21. MAPA KRIGING A 1KM DE PROFUNDIDAD CORRESPONDIENTE AL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA SUR.	69
FIGURA 22. MAPA KRIGING DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA SUR A 3KM DE PROFUNDIDAD.	70
FIGURA 23. MAPA KRIGING A 10KM CORRESPONDIENTE AL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA SUR.	73
FIGURA 24. MAPA KRIGING A 1KM DE PROFUNDIDAD CORRESPONDIENTE AL ESTADO DE SONORA	75
FIGURA 25. MAPA KRIGING DEL ESTADO DE SONORA A 3KM DE PROFUNDIDAD	77
FIGURA 26. MAPA KRIGING A 10KM DE PROFUNDIDAD CORRESPONDIENTE AL ESTADO DE SONORA.	78
FIGURA 27. MAPA DE INTERPOLACIÓN A 1KM DE PROFUNDIDAD CORRESPONDIENTE AL ESTADO DE SINALOA	79
FIGURA 28. MAPA KRIGING A 3KM DE PROFUNDIDAD CORRESPONDIENTE AL ESTADO DE SINALOA	80
FIGURA 29. MAPA KRIGING A 10KM DE PROFUNDIDAD CORRESPONDIENTE AL ESTADO DE SINALOA	81
FIGURA 30. GRAFICA DE VALIDACIÓN DE LOS VALORES ESTIMADOS POR EL MÉTODO DE INTERPOLACIÓN KRIGING, APLICADO AL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA	82
FIGURA 31. GRÁFICO DE VALIDACIÓN DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA SUR.	83
FIGURA 32. GRÁFICO CORRESPONDIENTE A LA VALIDACIÓN DE KRIGING DEL ESTADO DE SONORA	83

Resumen

Actualmente existe evidencia científica para asegurar que en casi todo México se tiene un cierto potencial geotérmico. Sin embargo, los numerosos sitios y las grandes áreas por cubrir hacen que las tareas de exploración y análisis de los recursos geotérmicos sean un gran reto científico.

En el caso particular del análisis del posible recurso geotérmico de un sitio o un área en particular, depende de la disponibilidad y calidad de datos necesarios para dicho estudio. Por lo tanto, para estimar el potencial teórico geotérmico de una determinada área, como es el caso del Noroeste de México para este proyecto, se requirió consultar diversas bases de datos y fuentes de información geocientífica.

En este contexto, se inició el proyecto con la búsqueda de un modelo analítico adecuado a las necesidades del estudio, que es poder estimar el potencial teórico geotérmico de una determinada área; Este consiste en la estimación de los isotermas de temperatura, así como el potencial térmico que puede ser extraído y el recurso térmico disponible de dicha área. Para ello, se creó una base de datos que se alimentó con información de los reportes de perforación de pozos profundos en la zona de estudio, específicamente datos geológicos y geofísicos.

Una vez seleccionado el modelo, se procedió a establecer las fórmulas necesarias para calcular las temperaturas desde la superficie hasta la capa límite de sedimento-basamento. Luego, se calcularon las temperaturas entre el límite sedimento-basamento y los tres kilómetros, y estos resultados se emplearon para obtener las temperaturas hasta los 10 km de profundidad.

Con los datos de temperaturas entre los 4 y los 10 km, se comenzaron a elaborar los mapas de isotermas, los cuales revelaron que el comportamiento térmico en Sinaloa era muy similar, en contraste con los estados de Baja California Sur y Sonora. A partir de estos datos, se realizó una comparativa entre el potencial eléctrico y el potencial teórico energético de cada región, demostrando una correlación directa entre ambos aspectos.

Palabras clave : geotermia, sistemas geotermicos mejorados, potencial energetico, isotermas, gradientes de calor

Abstract

Current scientific evidence shows that nearly all of Mexico has significant geothermal potential. However, the many sites and large areas to explore pose a considerable scientific challenge for the exploration and analysis of geothermal resources.

The analysis of a site or area's potential geothermal resources relies on the availability and quality of data essential for such a study. Therefore, to estimate the theoretical geothermal potential of a specific region, such as the Northwest of Mexico for this project, it was necessary to consult various databases and geoscientific information sources.

In this context, the project began by searching for an analytical model suited to its needs, which is to estimate the theoretical geothermal potential of a specific area. This involves estimating the temperature isotherms, the thermal potential that can be extracted, and the thermal resources available in that area. To achieve this, a database was created, populated with information from deep well drilling reports in the study area, specifically geological and geophysical data.

Once the model was selected, the necessary formulas were established to calculate temperatures from the surface to the sediment-basement boundary layer. Next, temperatures between the sediment-basement boundary and three kilometers were calculated, and these results were used to determine temperatures up to a depth of 10 kilometers.

Using temperature data between 4 and 10 km, isotherm maps were created. These maps showed that the thermal behavior in Sinaloa was very similar to that of Baja California Sur and Sonora. The data were then utilized to compare the electrical potential and theoretical energy potential of each region, demonstrating a direct correlation between the two aspects.

Capítulo 1

1.1 introducción

La energía geotérmica es definida como el calor natural de la tierra, el cual se encuentra alojado bajo la superficie y puede ser aprovechado para el beneficio humano. Aun cuando esta energía se dispersa, sobre todo en la corteza terrestre, hay regiones bien delimitadas de ella donde los flujos de energía térmica se concentran y presentan valores anómalos. (Arellano et al., 1993).

La energía geotérmica obtenida a grandes profundidades (> 400 m) o recursos geotérmicos profundos, son comúnmente empleados para la generación de energía eléctrica, aplicación que se denomina uso indirecto. Comúnmente son temperaturas con valores altos que suelen rondar los 180°C . Por su parte, la explotación del calor presente en las capas someras de la corteza terrestre (< 400 m) y en las aguas subterráneas se denomina uso directo. (Rangel et al., 2012).

En la década de 1970, en México se comenzó con el desarrollo de la primera planta geotérmica, para la generación de electricidad, Cerro Prieto, ubicada en el estado de Baja California. Posteriormente, se dio lugar a cuatro nuevas plantas: Los Hornos (Puebla), Los Azufres (Michoacán), Las Tres Vírgenes (Baja California Sur), y el Domo San Pedro en (Nayarit) [Gutiérrez -Negrín, 2023].

Aunado a esto, se han realizado estudios en zonas con posible potencial geotérmico, los cuales en su mayoría se han enfocado en demostrar la existencia de actividad geotérmica en algunas partes del país. Algunos trabajos tuvieron el fin de establecer qué zonas son las que han producido más energía (Aguilar, 2015), y evalúa el calor almacenado en sistemas geotérmicos (Aragón, 2015)

1.2 planteamiento del problema

El uso de combustibles fósiles ha tenido un impacto negativo significativo en el medio ambiente, contribuyendo al cambio climático y la contaminación del aire. Ante esta situación, la energía geotérmica emerge como una alternativa sostenible y limpia, que puede reducir la dependencia de los combustibles fósiles y disminuir la huella de carbono. La expansión de proyectos geotérmicos, tanto a nivel de generación eléctrica como en aplicaciones industriales y comerciales, representa una oportunidad clave para diversificar la matriz energética de México, promoviendo el desarrollo sostenible y la seguridad energética a largo plazo.

En México, los sistemas geotérmicos han sido utilizados principalmente para la generación de energía eléctrica, aunque también se han llevado a cabo algunos proyectos orientados

a su uso directo. Sin embargo, para desarrollar un mayor número de proyectos geotérmicos, tanto para la generación de potencia eléctrica como para aplicaciones de uso directo, es necesario explorar más zonas con potencial y cuantificar adecuadamente el recurso energético disponible.

Por esto se plantea desarrollar un proyecto que permita buscar alternativas para el uso de los sistemas geotérmicos con el cálculo de sus temperaturas y el potencial energético que puedan presentar cada una de las áreas a estudiar, esto con la finalidad de una vez obtenido el potencial máximo obtenido se puedan dar opciones de usos para estas zonas obteniendo sus potenciales para usos indirectos.

Justificación

Este proyecto tiene como objetivo estimar el potencial geotérmico teórico en áreas específicas de los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora y Sinaloa, mediante el uso de un método analítico compuesto. Este enfoque no solo permitirá cuantificar el recurso energético disponible en estas regiones, sino que también proporcionará una base sólida para la identificación de nuevas zonas con potencial geotérmico. Además, se apoyará con representaciones gráficas que faciliten la visualización y comprensión de los resultados obtenidos.

La energía geotérmica se presenta como una alternativa limpia y sostenible frente a los impactos negativos del uso de combustibles fósiles, los cuales contribuyen al cambio climático y la contaminación ambiental. En este sentido, desarrollar proyectos geotérmicos en México es esencial para diversificar la matriz energética del país, reducir la dependencia de fuentes no renovables y mitigar los efectos ambientales adversos.

1.3 Hipótesis

Mediante la aplicación del método de estimación teórica del potencial geotérmico, que utiliza como datos de entrada diversos parámetros geofísicos y geológicos, es posible determinar el contenido de energía térmica en distintas zonas de la Península de Baja California, Sonora y Sinaloa. Se espera que las temperaturas y el potencial geotérmico varíen significativamente entre estas regiones debido a las diferencias en sus características geológicas y litológicas. Posteriormente, a partir de esta información, se podrá estimar el potencial eléctrico que podría generarse en cada área, lo cual permitirá identificar las zonas con mayor viabilidad para proyectos de energía geotérmica y optimizar su aprovechamiento.

1.4 Objetivos

Objetivo general

Aplicar el método analítico del potencial teórico para evaluar el contenido energético que se encuentra en diversas áreas geotérmicas convencionales y no convencionales, ubicados en la zona noroeste de México, la cual está compuesta por los estados de Sonora, Sinaloa y la península de Baja California.

1.4.1 Objetivos particulares

- Crear una base de datos geológicos y geofísicos de las áreas estudiadas.
- Proponer una metodología que facilite la aplicación del método del potencial teórico geotérmico.
- Hacer una interpretación grafica adecuada para el buen entendimiento de los resultados obtenidos.
- Diseñar mapas temáticos para una buena interpretación y descripción de la distribución de las temperaturas de subsuelo de cada zona estudiada.
- Evaluar el potencial teórico geotérmico presente en las zonas de estudio, con base en los resultados obtenidos.

Capitulo 2

Antecedentes

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada, a continuación, se describen los trabajos previos que han contribuido al desarrollo y aplicación de métodos para la estimación de potenciales geotérmicos en diversas zonas del mundo.

En el 2005, Kohl mencionó que la comunidad geotérmica ha optado por desarrollar diferentes herramientas para lograr evaluar el potencial energético, que presentan algunas zonas, a través de modelos numéricos 3D que evalúen la temperatura del subsuelo. El trabajo de Kohl propone el método volumétrico, para el desarrollo del mapeo de puntos de calor, para posteriormente poder comparar las temperaturas obtenidas a diferentes profundidades del subsuelo. Para ello, se requieren diversos parámetros como datos hidrológicos, geología del subsuelo, así como la aplicación de métodos numéricos adecuados para establecer un modelo de calibración térmica.

En el trabajo de Blackwell et al. (2007) se presenta un mapa geotérmico de Norte América; para lo cual se utilizaron datos térmicos de la industria geotérmica y petrolera. Primero, aplicaron un modelo matemático para determinar la capacidad de transferencia de calor a través de las capas del suelo. Luego, para lograr el cálculo de la temperatura a distintas profundidades, el modelo de conductividad térmica se simplifica en una o dos capas en función de la litología del subsuelo. Sin embargo, para calcular los recursos totales se necesitan utilizar varios parámetros como el contenido de calor, geología regional, entre otros.

En 2009, Gibson publicó un modelo geológico 3D sintético, que incluye un relieve topográfico elevado y escenarios variables de los contrastes de la conductividad térmica; por lo tanto, presentó los resultados del modelado térmico empleando un método explícito de diferencias finitas para resolver la temperatura en estado estacionario. El modelo sintético es un banco de pruebas para el distrito de Köflach, en el este de Austria, en el cual se construyó un modelo geológico 3D con el software GeoModeller. El modelo de Köflach demuestra un modelado 3D realista de la temperatura y el flujo de calor, verificado con temperaturas y datos de flujo de calor medidos *in situ*, siempre respetando los efectos topográficos. El solucionador de GeoModeller rellena una cuadrícula cartesiana voxelizada, con temperaturas *in situ* estimadas, valores de flujo de calor y gradientes de temperatura. Los valores de salida son válidos para el punto central de la celda/voxel dada. Claramente, el fuerte relieve topográfico del modelo geológico ha tenido un efecto dominante en la distribución de la temperatura. Los resultados de temperatura se muestran además en 2D, donde de nuevo el fuerte impacto de la topografía en la distribución de la temperatura es evidente en todas las ejecuciones. (Braund, J. 2003)

Beardsmore (2009) describió los principales procesos de la perforación de zonas con subsuelos calientes y la observación del comportamiento de la temperatura del fluido de perforación y del reservorio; las temperaturas obtenidas del subsuelo durante la perforación son bajas debido a la perturbación térmica de este proceso, inician su aumento al transcurrir el tiempo una vez terminada la perforación, ya que tienden a estabilizarse (regresar a su temperatura original). Durante el proceso de recuperación térmica aún es posible hacer correcciones de las temperaturas medidas, considerando que aún no se llega al estado de equilibrio; esto es mediante varios modelos estadísticos, con lo cual se muestra una diferencia notable al comparar los gradientes de temperatura aún en proceso de recuperación térmica y al momento de ser corregidos, ya que la subestimación del gradiente no corregido de sistemas geotérmicos puede ser considerablemente mayor. Concluyendo que esto último afecta considerablemente en la estimación del potencial geotérmico de una zona estudiada.

Discroll (2010) publicó un estudio enfocado en las cuencas sedimentarias de Australia, en el cual presenta una propuesta para determinar los recursos geotérmicos, identificando cuatro factores geológicos: flujo de calor (conductivo y advectivos), resistencia térmica (aislamiento), características del yacimiento (conectividad de vacíos y régimen de esfuerzos prevaleciente) y el acceso a un fluido de trabajo (o vapor). El entorno geológico estudiado

dentro de la cuenca Canning, la cual se encuentra en el norte de Australia occidental, y cuenta con un sistema de fallas que dominan la cuenca norte. Durante el proyecto OZ SEEBASEv2, se encontró acumulación de 18 km de sedimento suavemente deformados del Ordovícico interior al cretácico. En el modelo de flujo de calor se proporcionó una base firme para la extrapolación de temperaturas a profundidad, ya que está basado en los principios de transferencia de calor; por otra parte, en el modelo de temperaturas y las extrapolaciones que se realizaron, utilizó únicamente los gradientes de temperatura derivados de las temperaturas de pozo, resultado de la aplicación del método Horner Plot (1951). Este corrige la temperatura del pozo por el efecto del enfriamiento, mediante los parámetros de temperatura del pozo (el tiempo desde la última circulación de fluido y el tiempo transcurrido entre el final de la perforación y el cesé de la circulación del fluido).

Majorowicz y Zürich (2010) realizaron un estudio en dos regiones de Canadá con alto potencial geotérmico, la cuenca sedimentaria del oeste de Canadá. En sus estudios previos, los autores publicaron por primera vez un marco teórico para un Protocolo para estimar y mapear el Potencial Teórico y el Potencial Técnico, según la definición de Rybach (2010).

Beardmore et al., 2010, en estos trabajos fue importante comenzar con la definición de la zona de estudio, para esto fue necesario tener los datos de las temperaturas en zonas profundas, la distribución de las temperaturas sub-superficiales y la geología. Para los datos de flujo térmico, se basan en el método clásico de la determinación de la densidad del flujo térmico superficial (Q_s), comúnmente utilizado para mediciones de temperatura de pozos en estado de equilibrio como en mediciones de laboratorio de la conductividad térmica (K), esto en conjunto con la ley de Fourier. Como resultado se obtuvo que las regiones con gran potencial energético han sido lugares como el oeste y noroeste de Canadá, ya que presentan ser regiones con flujo de calor similar al de las zonas con mayor potencial al oeste de Estados Unidos. No obstante, se observó que las zonas con mayor potencial energético no aparecen en sus mapas, esto debido a que el tamaño de las celdas no abarca estas zonas por la técnica de interpolación.

Cooper et al. (2010) plantean el uso de dos métodos para la estimación de los recursos geotérmicos, los cuales son el enfoque de calor almacenado y de reservorio dinámico. El enfoque de calor almacenado estima la energía térmica en el subsuelo, considerando un volumen de la roca. Los autores mencionan que el modelo de reservorio conductivo 3D se puede realizar de una forma simple y manual al utilizar aproximaciones volumétricas y gradientes geotérmicos, o utilizando todos los datos disponibles dentro de un marco conceptual termodinámico; para este último remarcaron aplicar el modelo de flujo de calor. En Australia se ha optado por utilizar métodos de obtención de calor de manera no convencional, esto principalmente por que el calor se transporta por conducción desde las rocas de la corteza subyacente y el manto. Y, en consecuencia, aunque hay pocos datos confiables para definir los sistemas geotérmicos, es posible predecir la temperatura en profundidad utilizando la teoría de la conducción de calor y las mediciones de flujo de calor superficial. En Australia cada vez más se acepta el flujo de calor conductivo al considerarse el más apropiado para estimar la temperatura en profundidad, donde no ha sido interpolado

o medido previamente. Pero también ocurre que el uso exclusivo de datos de temperatura para estimar la temperatura promedio del yacimiento puede introducir errores significativos.

Beardsmore (2011) presentó una versión revisada de un Protocolo para estimar y cartografiar el potencial teórico y técnico de los sistemas geotérmicos mejorados (EGS, por sus siglas en inglés), de una manera auto consistente a nivel mundial. El principal supuesto en el que se basa este Protocolo para estimar el potencial de los EGS, es que el transporte de calor a través de la corteza está dominado por la conducción vertical pura. Además, el proceso parte de que se puede utilizar un modelo geológico simple de dos capas, para que el Protocolo cumpla con la hipótesis de la transferencia de calor por conducción. Por este motivo, las regiones en las que se sabe que los mecanismos advectivos de transporte de calor influyen en los 10 km superiores de la corteza deben excluirse de las estimaciones del potencial de EGS, o bien evaluarse utilizando metodologías más adecuadas a las condiciones.

Gray et al. (2012) remarcaron que en la mayoría de los estudios geotérmicos es fundamental aplicar la medición directa en el subsuelo para estimar parámetros térmicos como el gradiente geotérmico, el flujo de calor y el calor disponible total. En su mayoría estas mediciones provienen de perforaciones profundas, pero esto conlleva costos sumamente altos, por lo cual, otra opción más económica es la exploración de medidas térmicas menos profundas para el desarrollo geotérmico. El estudio se centró en la cuenca de Alberta (Canadá), al realizar el primer análisis se contó con un limitado número de mediciones, por lo cual se recurrió a la recopilación de datos de temperaturas industriales, esto para poder dar estimaciones mejoradas de flujos de calor regionales. Al hacer revisión de estudios hidrogeológicos y geotérmicos, se realizó una eliminación de datos más antiguos y de menor calidad. La correlación de los perfiles temperatura-profundidad estableció que no son lineales al sufrir afectaciones por la fluctuación climática. Al eliminar los errores presentes en la base de datos, se crea un modelo más razonable de temperaturas del suelo, en el cual se muestran mapas con patrones generales. Sin embargo, al corregir los datos, estos muestran menor variabilidad y una región definida de bajo gradiente geotérmico. Los resultados mostraron que cada uno de los conjuntos de datos de temperatura contienen sus propios sesgos y problemas de calidad; en los casos analizados se demostró que los datos antiguos son menos precisos y de menor calidad a los obtenidos recientemente. (Gray et al. 2012)

Franz (2015) explicó que, para dar comienzo al desarrollo de un yacimiento geotérmico, se prepara un modelo numérico de datos calibrados y se compara con los datos obtenidos en campo. En los modelos numéricos geotérmicos se hace la distinción entre bloque de cuadrilla y sistemas computacionales volumétricos que por lo general presentan los elementos de fractura y matriz. Se utilizó un formato VTK (visualization toolkit), para el cual primero se calculó el calor almacenado en cada bloque de la red; el único parámetro al que no se puede acceder a través de las salidas de la simulación numérica fue la temperatura de rechazo (T_f). Utilizando un script de los datos VTK, se aplicó un filtro de convergencia a la temperatura de los bloques de cuadrícula individual, el cual colocó la convergencia en

bloques con la condición $T > T_f$; los datos demostraron claramente la importancia del parámetro de temperaturas de rechazo dependiendo de la aplicación. La determinación de calor almacenado a partir de un modelo numérico puede ser relativamente realista, se ha demostrado también que los filtros aplicados en el trabajo probablemente no sean todavía completamente restrictivos.

Aghahosseini & Breyer (2020) publicaron un estudio para demostrar el potencial teórico, técnico, económico óptimo y sostenible de los EGS a nivel mundial. Los mapas de temperatura en profundidad se calculan por cada capa de 1 km de espesor, de 1 a 10 km. Múltiples factores tales como el flujo de calor superficial, la conductividad térmica, la producción de calor radiactivo y la temperatura superficial son involucradas y obtenidas de diversas fuentes y suposiciones. En este estudio, el mundo está agrupado en un intervalo de cuadrícula regular de 1 grado por 1 grado, $1^\circ \times 1^\circ$, para evaluar el potencial de EGS. Esta suposición es diferente con el intervalo $5' \times 5'$ ($5' = 5 \text{ min} = 0.0833^\circ$) propuesto por Beardsmore et al (2011) en el Protocolo, debido al acceso limitado a los datos a nivel global. Es un desafío encontrar información confiable y precisa. Para estimar el potencial de EGS, se requieren varios datos de entrada, el modelado se lleva a cabo principalmente utilizando el software QGIS para datos geoespaciales, análisis y software Matlab para programación y simulación. Concluyendo que la base de recursos geotérmicos se encuentra entre las profundidades de 6 y 10 km, y hasta cierto punto a profundidades de 3 y 4 km, en el rango de temperatura de 150 a 300°C .

Evaluar el potencial geotérmico profundo resulta ser una parte esencial durante las primeras fases de cualquier proyecto geotérmico. Piris (2021) publicó un estudio basado en el método volumétrico “calor in situ” (heat-in-place: HIP), siendo esta técnica la más comúnmente utilizada para estimar el calor almacenado disponible y la fracción de calor recuperable de yacimientos geotérmicos profundos a escala regional.

En su metodología describe el método volumétrico HIP implementado por el Servicio Geológico de Estados Unidos. Este método considera el volumen del yacimiento, las propiedades petrolíferas, así como las temperaturas de reinyección del fluido extraído.

Kong & Pan (2021), en su trabajo dan los conceptos para realizar un catálogo de las fuentes de calor y su origen de este, para de esta forma poder comprender como se comporta la transferencia de calor y por lo tanto las diferentes curvas de temperaturas. Dentro del mismo catálogo podemos encontrar como un desglose de las diferentes fuentes de calor que se pueden obtener, comenzando con su origen en la corteza, lo cual a su vez se subdivide en tres eventos tectónicos generados por magma, producción de calor radiogénico y fusión parcial. Para clasificar los proyectos EGS de manera global, se aplicaron en total 35 categorías, en los cuales se recopilaron los datos de flujo de calor, temperatura del yacimiento, profundidad del pozo, tipo de roca y fuente de calor en cada sitio.

Antecedentes en México

Méndez et al. (2011) retomaron el estudio original de Alonso (1975) para presentar la primera estimación formal del potencial geotérmico en México. Este análisis estableció una

capacidad mínima de 100 MWe de recursos geotérmicos de alta temperatura en cada una de las siguientes regiones: Ixtlán de los Hervores, Los Negritos, Los Azufres, La Primavera, San Marcos, Hervores de la Vega, La Soledad y Los Humeros. La estimación se apoyó en el inventario nacional de manifestaciones termales desarrollado por la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE (GPG-CFE), lo que permitió identificar más de 1,380 manifestaciones térmicas en todo el país. Estas abarcan diversos tipos, como manantiales, hervideros, fumarolas, volcanes de lodo, suelos calientes, pozos y norias con agua caliente. El análisis se basó en la clasificación de dichas manifestaciones según los rangos de temperatura determinados mediante el uso de geotermómetros, seleccionados conforme a los requerimientos técnicos de cada caso. Para estimar las reservas geotérmicas, se aplicó el método volumétrico, lo que permitió calcular el potencial geotérmico a nivel nacional.

En el trabajo de Aguilar (2012) se analizó un campo productor mexicano, con alta temperatura registrada y una baja permeabilidad. Su enfoque era recuperar los pozos no productores que tuvieron su terminación años atrás y hasta ese entonces no presentaban un uso, pero debido a la heterogeneidad del yacimiento, los pozos productores y los no productores aparecen como vecinos a lo largo del campo. De acuerdo con la información disponible, se utilizaron registros de temperatura en la profundidad total del pozo, se observó que los valores medios son obtenidos en tiempos de espera prolongados, por medio de ese hecho se explica el comportamiento de la distribución de las isotermas. Posteriormente, Aguilar (2015) presentó un análisis realizado de un área determinada del campo geotérmico Los Humeros, para una evaluación de su almacenamiento de calor y la probable generación de electricidad. En su metodología, como primer paso, explica el uso de la ecuación de conducción de calor, para posteriormente agregarla a la ecuación del método volumétrico. Estos métodos fueron utilizados para determinar la cantidad de calor producido en los yacimientos debido a las características geológicas presentes en la zona, al ser lugares con baja permeabilidad se les dificulta la transferencia de calor en un punto óptimo. Debido a la falta de datos de pruebas de presión transitoria, utilizaron registros de circulación de pérdida de flujos durante la perforación, así determinar la permeabilidad del yacimiento en cada pozo.

glesias et al. (2016) realizaron una estimación preliminar del potencial de generación eléctrica a partir de sistemas geotérmicos mejorados en México. Para ello, integraron datos geográficos, litológicos volumétricos y propiedades físicas del subsuelo. El modelo propuesto se estructuró en dos capas: una superior de sedimentos que recubre al basamento, y se asumió un flujo de calor vertical. La profundidad máxima considerada fue de 10 km. Se modeló el ingreso del flujo térmico desde el manto a la base del sistema, con transporte de calor vertical en el basamento controlado por su conductividad térmica.

La resolución espacial del modelo se definió dividiendo el área en una malla de 5'x5'; bajo cada celda se establecieron bloques de 1 km de espesor. Además, fue necesario estimar la distribución superficial del flujo térmico en la superficie continental. Los resultados obtenidos para el potencial teórico de generación eléctrica fueron tabulados considerando el basamento aflorante en la parte continental de México, organizando los datos por entidad

federativa y por profundidad. Cabe destacar que este basamento aflora en aproximadamente el 10 % del territorio nacional.

Franco et al. (2017) analizaron la problemática de la estimación del potencial de los yacimientos geotérmicos, con el propósito de dimensionar las centrales geotérmicas para alcanzar el objetivo de una correcta combinación de renovabilidad y cuestiones económicas relacionadas. Los problemas relacionados con una estimación no corregida del potencial energético, como la explotación excesiva de un yacimiento geotérmico, ya que en varios casos en la práctica industrial la extracción de fluidos alcanza tasas excesivas y no han sido posibles mantener la producción en el largo plazo. Para la evaluación del potencial geotérmico se debe considerar el concepto de rentabilidad, el cual se define como la capacidad de mantener la capacidad de energía instalada de una planta indefinidamente sin encontrar ninguna degradación del recurso.

Pról-Ledesma (2018) presentó diversas metodologías orientadas a la identificación de prospectos geotérmicos en la República Mexicana, con el propósito de definir nuevas provincias geotérmicas. En ese contexto, se identificó una región previamente no considerada en los inventarios de Recursos Geotérmicos de México: la denominada Mesa Central. Las anomalías térmicas detectadas se correlacionaron con temperaturas elevadas estimadas mediante el geotermómetro de sílice, así como con profundidades poco profundas de la isoterma Curie. Este estudio establece una base importante para futuras evaluaciones del potencial geotérmico en las Provincias de Volcanismo Alcalino, consideradas como expresión del evento térmico más reciente en extensas áreas del norte, centro y noreste del país. A partir de la evidencia de dichas anomalías térmicas y su vínculo con procesos volcánicos recientes, se logró definir la Provincia Geotérmica de Volcanismo de Interplaca.

Fernández de la Vega Márquez (2019) mencionó que, en México, los pozos de petróleo y gas abandonados se pueden convertir fácilmente en pozos geotérmicos. Aunque es importante mencionar que en este tipo de sistemas la producción de energía es menor en comparación con sistemas geotérmicos regulares, de cualquier forma, esto se ve compensado por los bajos costos de inversión en el resto del proyecto. En la metodología aplicada, el primer paso fue identificar las condiciones físicas del área de estudio. Considerando los datos disponibles, se generó un mapa de temperatura del gradiente geotérmico a diferentes profundidades y también se generó un mapa de porosidad utilizando el método IDW de interpolación. Por lo tanto, se presentaron mapas de gradiente geotérmico, flujo de calor y porosidad junto con isóneas de profundidad, visualmente útil para una primera aproximación a la determinación de qué pozos representan las mejores alternativas para su reutilización con energía geotérmica.

Pról-Ledesma (2020) propuso la evaluación preliminar de los pozos petroleros como productores geotérmicos, para ello se requiere la disponibilidad de información sobre el gradiente geotérmico, flujo de calor y porosidad de las rocas del subsuelo. Los datos

disponibles sobre los yacimientos de petróleo y gas mexicanos son escasos; sin embargo, se presenta un intento de evaluar los pozos más favorables para iniciar el aprovechamiento de la energía geotérmica mediante el uso de modelos multicitados.

Recientemente, Espinoza-Ojeda et al. (2023) publicaron un trabajo sobre la actualización de la base de datos de flujo de calor y gradiente geotérmico en el país. Utilizando datos geológicos y geofísicos de pozos profundos geotérmicos y petroleros, brindaron un mejor entendimiento de los recursos geotérmicos en el país, ya que se describieron zonas que antes no habían sido consideradas con posible potencial geotérmico.

Capítulo 3

Marco teórico

En este Capítulo se describen los trabajos que han empleado y en algunos casos mejorado métodos para el cálculo del potencial geotérmico. A continuación, se hará la descripción de manera cronológica.

El método volumétrico en los sistemas geotérmicos mejorados ha sido desarrollado a través de los años comenzando con Khol (2005), quien lo utilizó para determinar el potencial energético geotérmico. Como resultado, propuso un atlas regional de sistemas geotérmicos mejorados en la región de Suiza, lo cual permitió conocer cuáles serían las zonas más atractivas para desarrollo de proyectos geotérmicos. La ecuación principal aplicada es:

$$EHIP = \rho C_p \cdot V \cdot (T_{prod} - T_{rein}) \quad (1)$$

siendo *EHIP* la energía térmica almacenada en el subsuelo, generalmente denominada "calor in situ", ρ es la densidad y C_p la capacidad calorífica de la roca, V el volumen, T_{prod} la temperatura del fluido y T_{rein} , la temperatura del fluido reinyectado.

Para el año de 2007, Blackwell et al crearon un mapa geotérmico de Norte América, en el cual utilizaron el método volumétrico como modelo numérico; para ello usaron mediciones de temperatura a diferentes profundidades, lo que permitió generar un atlas de las zonas de calor y de esta manera poder clasificarlas para su potencial.

$$T(X) = T_0 + [Q X/K] + A b_0 2 [(1 - e^{-X/b_0}) / K] \quad (2)$$

donde $T(X)$ es la temperatura a la profundidad X ; Q es el flujo de calor; K es la conductividad térmica de la roca; A es la contribución de calor radioactivo; b_0 es el valor de generación de calor en las rocas; T_0 es la temperatura superficial.

Beardsmore (2009) implementó el método volumétrico para encontrar zonas con potencial geotérmico en Australia y poder ser explotados. Para ello, primero debía obtener los datos de flujo de calor, aplicando la siguiente ecuación:

$$Q = -K \cdot G \quad (3)$$

donde Q es el flujo de calor, G es el gradiente geotérmico, y K es la conductividad térmica de la roca.

Con este parámetro geofísico, se analizó el proceso de la perforación de zonas calientes y la observación del comportamiento de la temperatura del fluido de perforación y del reservorio; las temperaturas de la formación obtenidas al principio de la perforación son bajas debido a la perturbación térmica de este proceso, inician su aumento al pasar el tiempo ya que tienden a estabilizarse.

Piris (2021) publicó un estudio que aplica el método volumétrico "calor in situ" (HIP: Heat in Place), por sus siglas en inglés para estimar el calor almacenado disponible y la fracción de calor recuperable de yacimientos geotérmicos profundos a escala regional. El método HIP está dada por la siguiente ecuación:

$$HIP = V \cdot [\phi \cdot \rho_F \cdot C_F + (1 - \phi) \cdot \rho_R \cdot C_R] \cdot (T_r - T_i) \quad (4)$$

donde V es el volumen del voxel (m^3), ϕ es la porosidad de la roca (Kg/m^3), C es la capacidad calorífica específica (kJ/kg). Los subíndices F y R se refieren a los parámetros que provienen del fluido y la roca huésped, respectivamente. T_r es la temperatura del yacimiento y T_i es la temperatura de reinyección.

Por otro lado, Beardsmore (2019) describe el “Protocolo Global para Estimar y Mapear el Potencial EGS”. El objetivo de este protocolo es estimar el posible potencial geotérmico a través de la estimación de la distribución de temperaturas en el subsuelo, usando un modelo geológico de dos capas (sedimento y basamento). Por lo tanto, una vez que se determina el espesor del sedimento, y, en consecuencia, la profundidad a la que se encuentra el basamento se procede a determinar las propiedades termofísicas de cada tipo de roca.

Primero, en el caso donde el punto medio sedimento-basamento sea para un máximo de 3 km, la temperatura del sedimento se calcula con la siguiente ecuación:

$$(5) \quad T_s = T_0 + S/2 * Q_0/K_{S0}$$

Donde T_0 es la temperatura superficial, Q_0 el flujo de calor superficial, S el espesor de sedimento, y K_{S0} es la conductividad térmica inicial del sedimento.

Después, para el cálculo de la conductividad térmica ajustada del sedimento ($K_{S-insitu}$), se utiliza la siguiente ecuación:

$$(6) \quad K_{S-insitu} = K_{S0} \times [1 + (0.0017(T_0 - T_s))]$$

Donde T_s es la temperatura del sedimento. Para el caso donde el espesor del sedimento sea menor a 3km, para calcular las temperaturas en el punto medio sedimento-basamento se utiliza lo siguiente:

$$(7) \quad T_s = T_0 + [(Q_0 * S)/K_{S-insitu}] - A_s * [S^2/(2 * K_{S-insitu})]$$

Donde A_s la generación de calor en el sedimento.

Posteriormente, se requiere estimar los valores de la conductividad térmica y de la generación de calor del basamento, las cuales se calculan de la siguiente manera:

$$(8) \quad K_B = K_{S0} - (GB/200) \times (K_{S0} - 2.70) \text{ W/mk}$$

$$(9) \quad AB = K_{B0} - (GB/200) \times (K_{B0} - 0.02) \mu\text{W/m}^3$$

Donde K_{B0} es el valor inicial de la conductividad térmica del basamento, y GB es el valor de gradiente de Bouger.

Luego, se procede a sustituir $K_{S-insitu}$ en la ecuación del punto medio de temperatura entre la frontera Sedimento-Basamento, teóricamente a los 3 kilómetros de profundidad, sin embargo, esta profundidad puede variar dependiendo de las características geológicas particulares de la zona de estudio.

$$(10) \quad T_B = T_0 + [S * Q/K_{S-insitu}] + [((3.0 - S)/2) * (Q/K_{B0})]$$

se calcula la conductividad térmica del basamento en función de la variación de la temperatura, la cual se obtiene de la siguiente manera:

$$(11) \quad K_{B-insitu} = K_B * [1 + (0.0017(T_0 - T_B))]$$

Para el cálculo de la temperatura en el subsuelo desde 1 hasta 3 km de profundidad, cuando esta cae dentro del basamento, se aplica la siguiente ecuación:

$$(12) \quad T_X = T_S + [(Q_S \cdot (X - S)) / KB_{\text{insitu}}] - AB \cdot [(X - S)^2 / (2 \cdot KB_{\text{insitu}})]$$

Donde T_X es la estimación de la temperatura a diferentes profundidades (1, 2, y 3 Km), $Q_S = Q_0 - S \cdot A_S$ el flujo de calor en el límite sedimento-basamento, X es la profundidad donde se calcula T_X (1, 2, y 3 km: $X > S$), y A_B la generación de calor en el basamento.

Por último, para la estimación del potencial teórico EGS. Primero, se calcula el calor contenido (H), la cual depende principalmente de la temperatura a los 3 kilómetros y de la temperatura inicial. Entonces, se procede a calcular el Potencial teórico EGS (P):

$$(13) \quad H = \rho \cdot C_p \cdot V_c \cdot (T_{3\text{km}} - T_r) \cdot 10^{-18}$$

$$(14) \quad P = (H \cdot 10^{12} \cdot \eta_{\text{th}}) / 9.46 \cdot 10^8$$

Donde ρ es la densidad, C_p la capacidad calorífica específica, $T_{3\text{km}}$ es la temperatura a 3km de profundidad, T_r es la temperatura base ($T_r = T_0 + 80^\circ\text{C}$), y η_{th} es la eficiencia térmica de ciclo ($\eta_{\text{th}} = 0.00052 \cdot T_{3\text{km}} + 0.032$).

Por último, el Potencial técnico EGS, que se refiere al el Potencial teórico EGS que puede ser extraído una vez considerado las limitaciones técnicas. El cual está dado por:

$$(15) \quad PT = P \cdot R_{\text{av}} \cdot R \cdot RTD$$

Donde R_{av} es el factor de disponibilidad basado en el acceso de la tierra ($0 \leq R_{\text{av}} \leq 1$), R es el factor de recuperabilidad ($0 \leq R \leq 1$), y RTD es el factor de recuperación de temperatura ($0 \leq RTD \leq 1$). Los factores de recuperabilidad recomendados son $R = 0.02$, 0.14 y 0.20 como mínimo, medio y máximo, respectivamente. Para volúmenes de roca donde la $T_{3\text{km}}$ fue 10°C menor sobre T_r , un valor de $RTD = 1$ es recomendado. En caso contrario, RTD se estima de la siguiente manera:

$$(16) \quad RTD = 10 / (T_{3\text{km}} - T_r)$$

Capítulo 4

Áreas de Estudio

A continuación, se hará una descripción regional de cada zona de estudio, comenzando con la presentación del mapa de del área de estudio y los puntos de interés que se encuentran comprendidos por la Península de Baja California, Sonora y Sinaloa. En la Figura 1 se muestra la ubicación de los sitios que serán analizados.

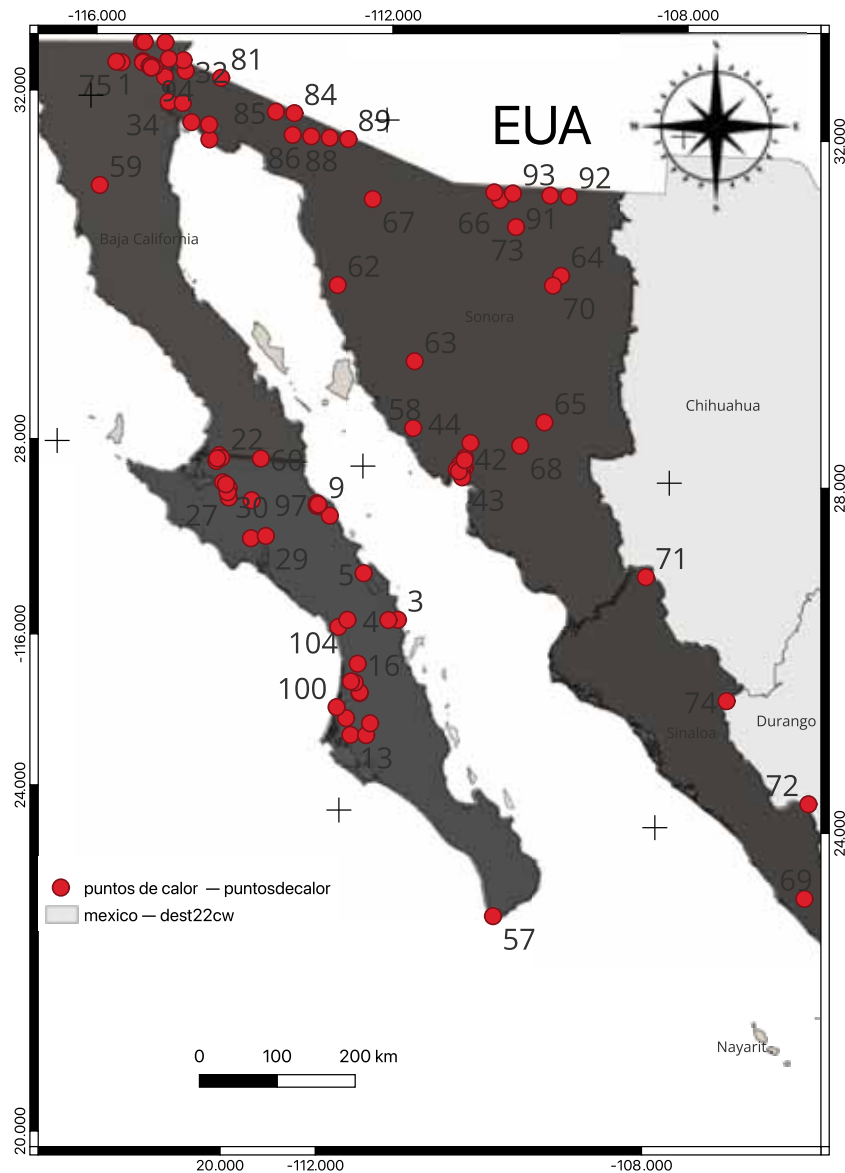


figura 1 . Mapa de ubicación de los sitios considerados para estimar el potencial geotérmico de distintas zonas de estudio dentro de la península de Baja California, y los estados de Sonora y de Sinaloa. Datos obtenidos de Espinoza-Ojeda et al (2023).

Posteriormente se dará una descripción general de la geología de cada estado, correspondientes a la zona de estudio en este proyecto: Baja California (figura 2), Baja California Sur (figura 3), Sonora (figura 4) y Sinaloa (figura 5).

4.1 Baja California

Baja California (BC) es una de las 32 entidades federativas de la República Mexicana, la cual se encuentra ubicada en el noroeste de México, en la Península de Baja California; sus coordenadas al norte 32° 43', al sur 28° de latitud norte, al este 112° 45', y al oeste 117° 19' de longitud oeste. Tiene una extensión territorial de 71,450 Km², ocupando el lugar 12 a nivel nacional; limitando al norte con California (EUA), al este con el Golfo de California y Sonora, al sur con Baja California Sur, y al oeste con el Océano Pacífico.

El estado de Baja California comparte con el resto de la península una historia geológica común, al contar con una cordillera peninsular que está formada en su núcleo granítico de gran tamaño. Esta zona está constituida litológicamente por gran variedad de rocas de los tres tipos, fundamentalmente ígneas, sedimentarias y metamórficas, cuyas edades abarcan desde el Paleozoico hasta el Cuaternario.

La estructura volcánica dentro de la zona conocida como Cerro Prieto consta de dos centros eruptivos superpuestos los cuales dan origen a los afloramientos de rocas volcánicas andesíticas y riodacíticas, esta distribución de sedimentos dentro del Valle de Mexicali y el Valle Imperial las cuales se han visto afectadas por el movimiento hacia el NO de la Península de Baja California a lo largo del sistema de fallas de San Andrés (Aguilar, 2008).

Los procesos que han dominado la evolución tectónica de esta región es la terminación de la subducción de la placa Farallón hace aproximadamente 12.5 Ma (Mammerickx and Klitgord, 1982) y la apertura del Golfo de California que fue el resultado de la extensión oblicua entre la Placa del Pacífico y la de Norteamérica (Atwater, 1970). Específicamente la zona donde se encuentra San Felipe corresponde a una cuenca deposicional entre dos bloques elevados que constituyen la Sierra de San Felipe y la Sierra de Santa Rosa (Siller et al., 2010), con dos fallas strike-slip que transitan la península: las fallas Agua Blanca y San Miguel.

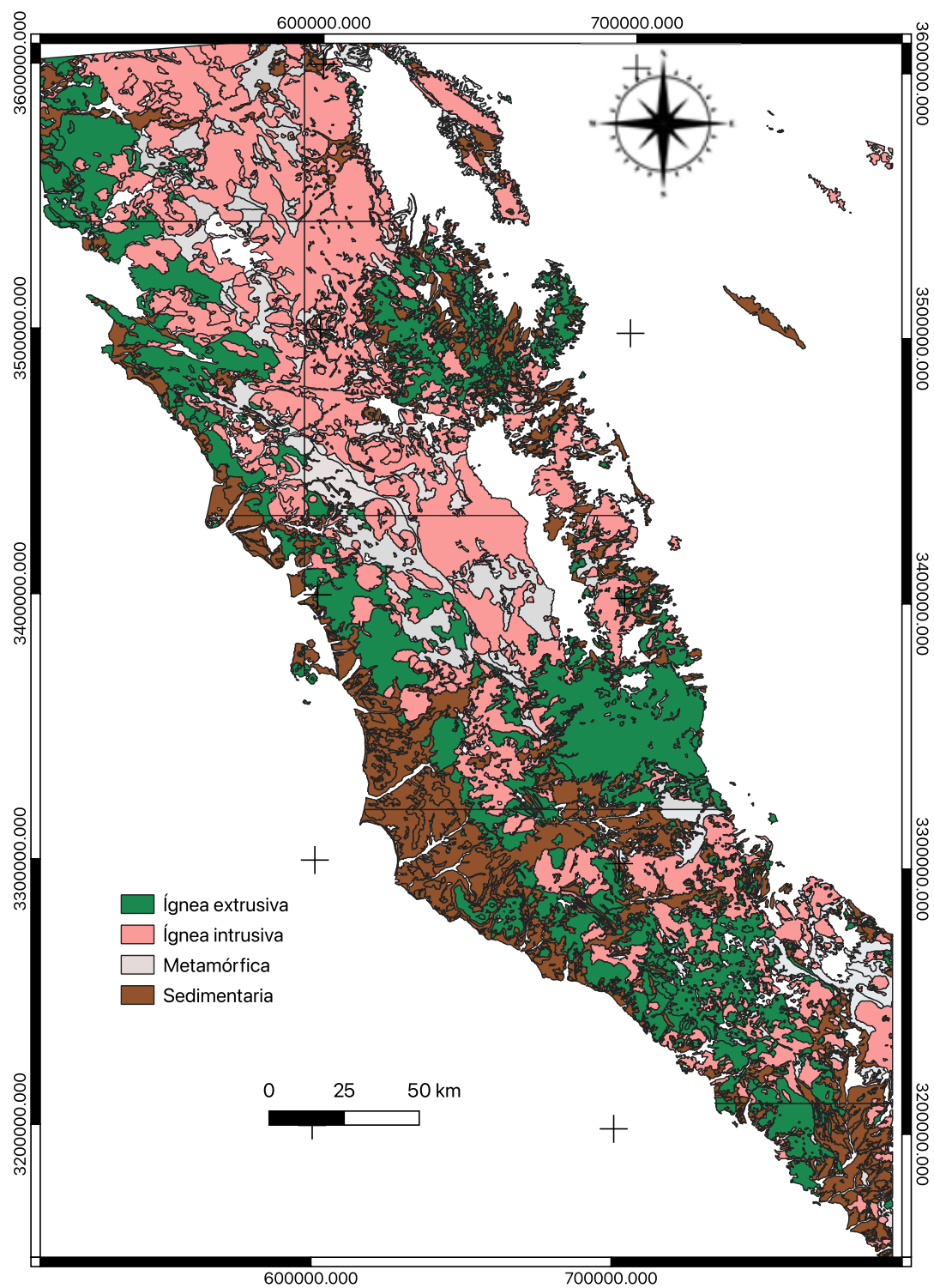


figura 2. Mapa geológico del estado de Baja California (creado con datos obtenidos de INEGI y editados en Qgis).

En el año de 2005, Villanueva et al. realizaron informes referentes a actividad hidrotermal submarina poco profunda en la zona de Bahía Concepción, en el Golfo de California, estas probablemente tengan relación con la tectónica extensional del Golfo de California. La ventilación hidrotermal se presenta en áreas intermareales y submarinas poco profundas, siendo la temperatura de los respiradores submarinos entre los 50 – 87°C a una profundidad de 10cm.

En 2019, Macías et al. llevaron a cabo un estudio sobre los procesos de extensión cortical y la génesis del Sistema Extensional de Cerralvo (SEC), ubicado al sur del Golfo de California, a partir de datos de reflexión sísmica bidimensional. A partir del análisis de los resultados obtenidos, los autores propusieron que el modelo geológico que mejor explica la evolución del SEC corresponde a una cizalla simple. Este modelo se caracteriza por un sistema maestro de fallas de bajo ángulo, donde la rotación de bloques hacia el oeste ocurre a lo largo de una zona basal de despegue, generando cuencas asimétricas controladas por fallas antitéticas.

Pról-Ledesma en 2023, realizó un estudio geofísico en la ciudad de San Felipe, este proporcionó evidencia de presencia de valores de resistividad anómalamente bajos, lo cual sugiere la presencia de un sistema hidrotermal. Para esto se llevó a cabo un estudio de la actividad volcánica de la zona, sin embargo, no se reportó actividad magmática reciente, no obstante, la integración de los datos geológicos, geoquímicos y geofísicos obtenidos en la zona comprendida de San Felipe, dan el fundamento de la existencia de un considerable yacimiento geotérmico con dimensiones mayores a los 5 km³ y con temperaturas mayores a 200°C.

4.2 Baja California Sur

De acuerdo con Jones et al. (1976), Rangin (1978), Kimbrouhg (1982) y Baldwin y Harrison (1992), Baja California Sur (BCS) está litológicamente formado por rocas sedimentarias y volcanosedimentarias de ambiente de arco de isla, así como por cuerpos ofiolíticos y otras rocas metamórficas del Mesozoico (figura 3).

Del mismo modo, BC y BCS comparten características similares en cuanto a la clasificación de rocas más representativas, lo cual podemos comprobar en la siguiente carta geológica.

En el complejo volcánico comprendido como Tres Vírgenes está localizado en el dominio tectónico transtensional del sistema de fallas laterales derechas que proporcionan la separación de México.

Dentro de este campo volcánico y sobre el basamento han formado rocas que van desde el cretácico al plioceno, el cual pueden reconocer tres grandes complejos volcánicos, con evolución diferente, la Caldera Reforma, Caldera del Aguajito y el complejo volcánico de tres vírgenes, este último tiene dos domos donde se han desarrollado el campo geotérmico (Macías y Jiménez, 2013).

En las inmediaciones de La Paz aflora la unidad de riolacita Providencia, la cual representa la secuencia más joven del Terciario medio en la región. Esta formación volcánica da origen a colinas de cimas planas, con una inclinación suave hacia el poniente. Se considera que estas colinas son remanentes de la erosión de una antigua plataforma continua. La pendiente observada en estas superficies podría tener un origen primario, asociado con la inclinación original de las unidades volcánicas, ya que se estima que la mayoría de los centros eruptivos se localizaron en la margen occidental del Golfo de California (Andara y Pérez, 1988).

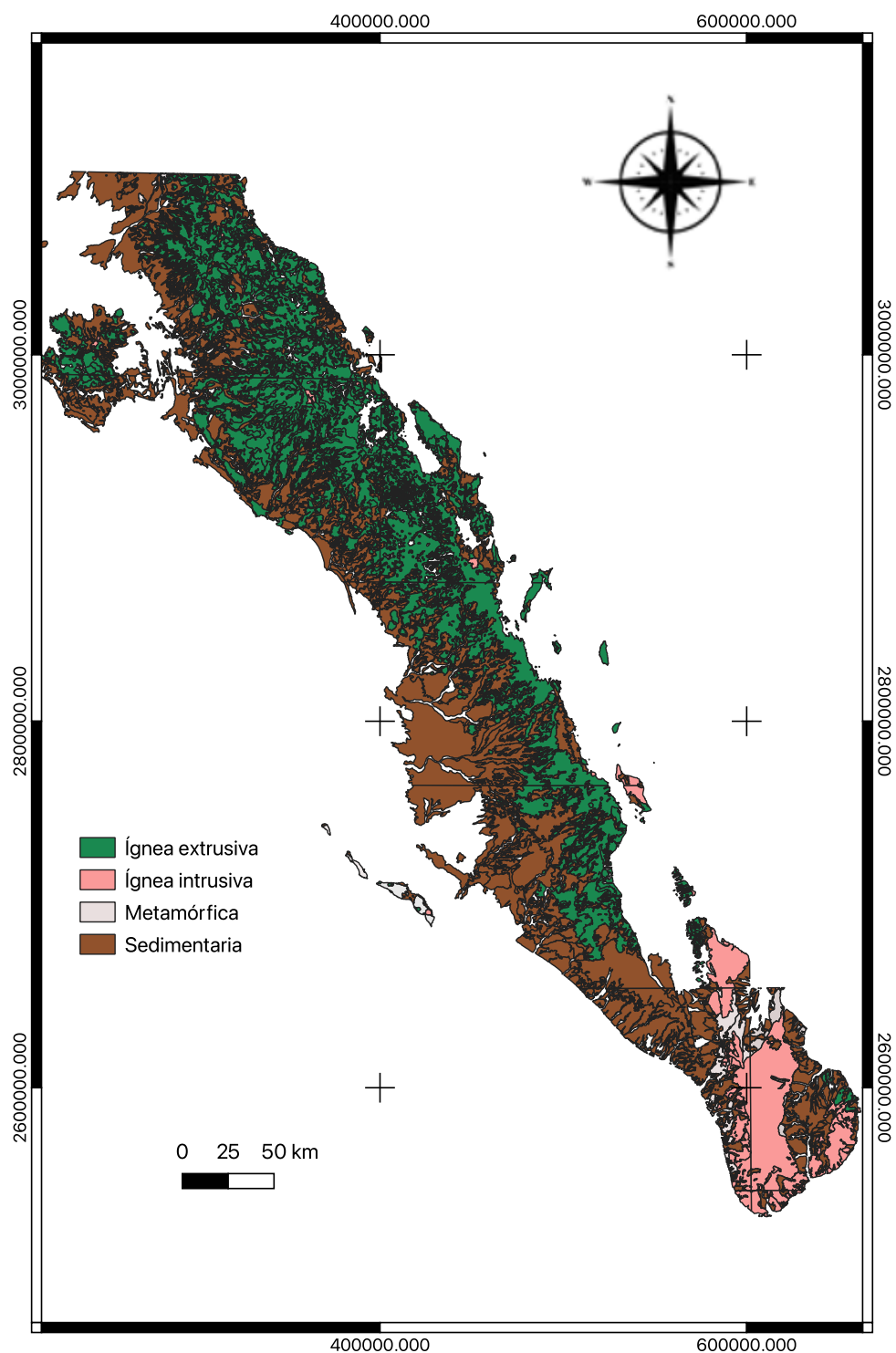


figura 3. mapa geológico del estado de Baja California Sur, datos obtenidos a través de INEGI y editados en Qgis

).

4.3 Sonora

El estado de Sonora (figura 4) está ubicado en la región noroeste del país, limitando al norte con Arizona y Nuevo México (Estados Unidos), al este con Chihuahua, al sur con Sinaloa y al oeste con el Golfo de California y Baja California. Con 179 355 km², es el segundo estado más extenso —por detrás de Chihuahua— y con 14.83 Hab/km², el quinto menos densamente poblado, por detrás de Campeche, Chihuahua, Durango y Baja California Sur. Sonora cuenta con yacimientos de plomo y zinc, que se presentan en zonas de reemplazamiento metasomático y en vetas hidrotermales, que se asocian generalmente a rocas volcánicas del Cenozoico Medio.

Las rocas dominantes con edades variables entre el precámbrico y el holoceno son aluviales, conglomerado, rocas volcánicas, granito, las cuales presentan una diferencia entre las rocas metamórficas y plutónicas del precámbrico y las rocas con metamorfismo y deformación de posible edad jurásica, además de la presencia de rocas volcanosedimentarias del cretácico o superior (Rodríguez Castañeda, 1994).

La Sierra Los Tanques se ubica en el noroeste del estado de Sonora, al este del campo volcánico El Pinacate. En esta zona afloran unidades litológicas de composiciones variadas, dominadas por gneises bandeados cuarzo-feldespáticos con biotita, gneises de clorita-biotita y, en menor proporción, paragneises con biotita o dos micas. También se observan intercalaciones de esquistos y filitas de clorita-biotita-epidota, así como anfibolitas de espesor variable. Los principales afloramientos se concentran en el sector sureste de la sierra, aunque también se presentan exposiciones aisladas en las zonas central y noroeste. El basamento precámbrico exhibe foliación bien desarrollada; en algunos sectores se identifican bandas cuarzo-feldespáticas augenadas, mientras que en otras áreas se conservan las texturas ígneas del protolito. En ciertos casos, las rocas muestran foliación milonítica, lo que sugiere deformación tectónica posterior (Rascón et al., 2012).

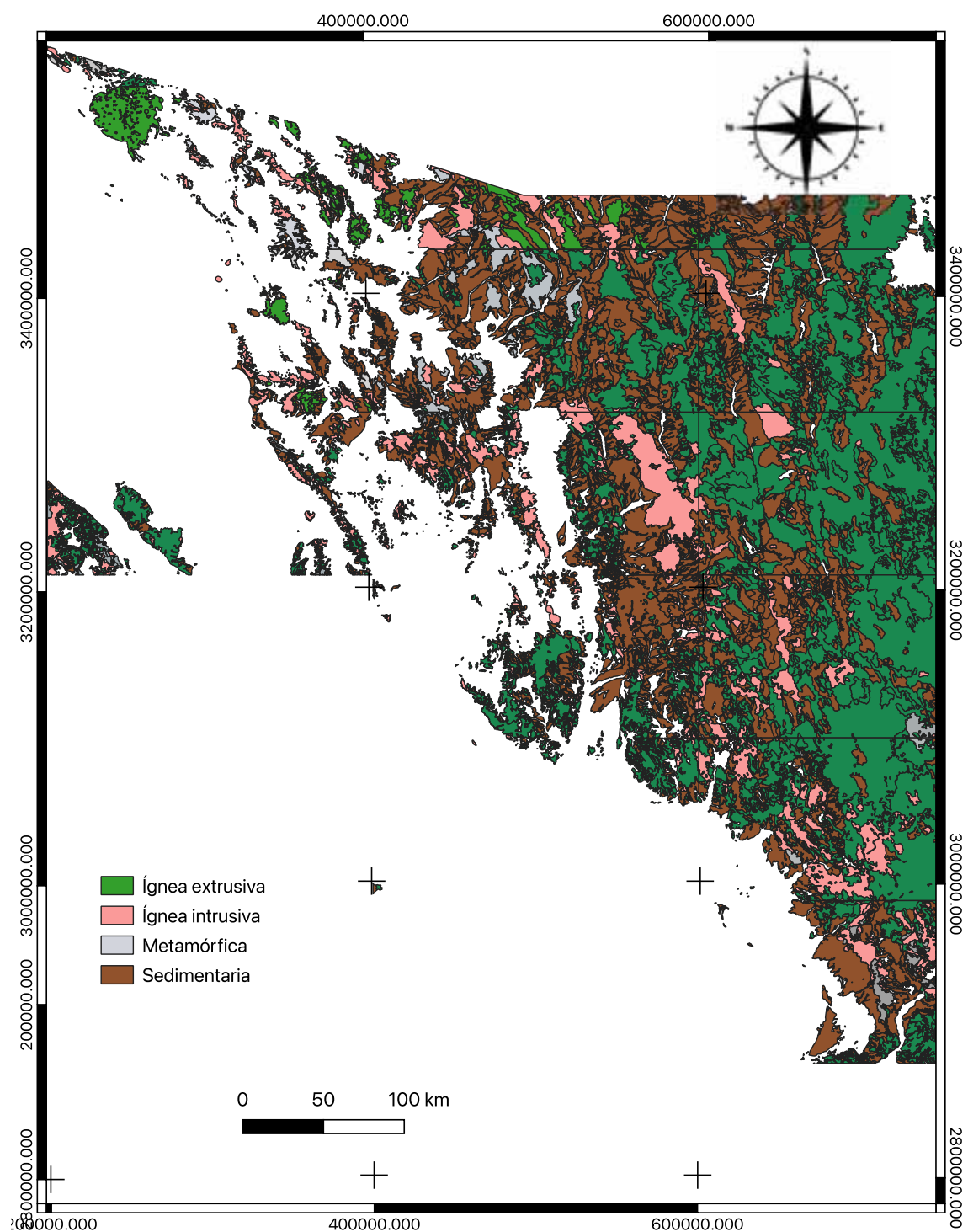


figura 4. Mapa geológico de Sonora (creado a través de datos de INEGI y editados en Qgis).

El estado de Sonora cuenta con una geología bastante interesante tanto por la variedad de rocas, como por la gran amplitud temporal, esto al tener abundancia de rocas que van desde el precámbrico hasta el reciente, en la zona noroeste del estado entre los límites del estado de Chihuahua predominan las rocas volcánicas del oligoceno -mioceno; por otra parte, las rocas intrusivas cubren grandes extensiones, como también las rocas intrusivas que están representadas por areniscas y calizas del cretácico temprano (Roldán Quintana, 1979).

4.4 Sinaloa

El estado de Sinaloa se encuentra ubicado en la región noroeste del país, limitando al norte con Sonora y Chihuahua, al este con Durango, al sur con Nayarit y al oeste con el Golfo de California y el Océano Pacífico.

Sinaloa es caracterizada por un intrusivo granodiorítico de gran extensión el cual presenta remanentes de erosión en cuerpos de rocas calizas y descansando discordantemente sobre estas rocas se tiene una secuencia volcánica de tobas y derrames riolíticos.

En Sinaloa se presentan tres complejos Paleozoicos, (el Fuerte, el Agua Caliente y Mazatlán), los cuales pertenecen al terreno Tahué el cual aflora al noroeste de México, el cual consiste en rocas pelágicas y silicoclasticas Mississippianas-permianas, por este motivo es que sus rocas del basamento son génesis del Paleozoico. Este es un fuerte complejo esencialmente mafico que tiene un afloramiento en la localidad de Realito el cual tiene una longitud de 2km, y 0.5km de ancho (Ortiz et al., 2006).

La geología regional de Sinaloa consta de rocas metamórficas pertenecientes al cinturón metamórfico de la Cordillera Real el cual constituye el basamento cristalino sobre el cual se levantan los volcanes Antizana y Cayambe, cabe mencionar que las rocas estudiadas en esta zona fueron divididas debido a su granulometría en pelíticas y cuarzo feldespáticas (metapelitas). Las rocas metamórficas de esta serie, son bien foliadas, las cuales se tratan meso pliegues con amplitudes no mayores de 1 cm. Este grupo de rocas volcánicas fue considerado como un miembro de la formación Chapiza, la cual tiene su parte superior en el miembro volcánico Misahualli (Décker, 1990).

En la región de la Sierra Madre Occidental se puede observar buena parte del basamento pre-oligoceno sobre el que se derraman las extensas y voluminosas formaciones riolíticas, los datos geológicos registrados en la región muestran una secuencia paleozoica, cubierta discordantemente por volcánicas cenozoicas en contacto tectónico con rocas calcáreo-arcillosas del cretácico, la secuencia consiste en unidades ígneas y sedimentarias que descansan tectónicamente a lo largo de una zona de cabalgadura con poca inclinación sobre rocas verdes filonitas (Ortega Gutiérrez et al., 1979).

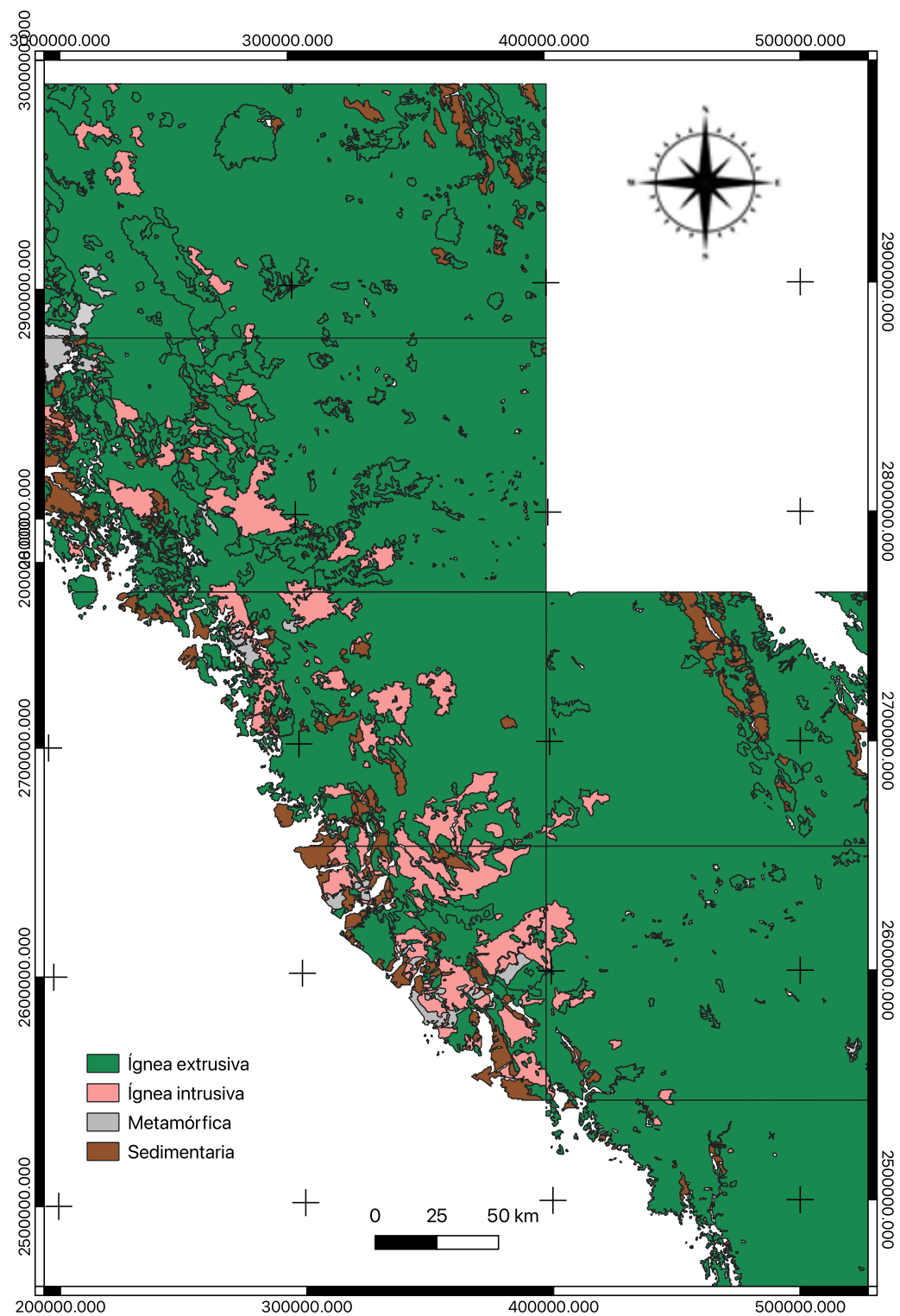


figura 5. Mapa geológico del estado de Sinaloa , datos obtenidos de INEGI y editados en Qgis.

Capítulo 5

Metodología

En este capítulo se describirá la metodología propuesta para este trabajo de investigación, con base a los métodos de estimación de potencial geotérmico analizados, y sus requerimientos de aplicación.

A continuación, se describen las diferentes tareas que conforman la metodología:

1. Base de datos. Se llevó a cabo la creación de una base de datos, la cual consiste en datos geológicos, específicamente la litología de pozos geotérmicos y petroleros, De esto se puede conocer la conductividad térmica de cada roca, así como la producción de calor, consultando valores publicados en la literatura internacional. Otros parámetros muy importantes incluidos en la base de datos, es el gradiente geotérmico y el flujo de calor de cada sitio, así como las coordenadas geográficas. La elevación de cada sitio con respecto al nivel del mar, esto se llevó a cabo mediante el uso del programa de Google Earth. Y, por último, el espesor del sedimento y el gradiente de Bouger de cada sitio.
2. Estimación del potencial geotérmico. Aplicando el modelo matemático descrito por Beardsmore (2019), el cual se utiliza para determinar el potencial energético de yacimientos geotérmicos EGS (ver Capítulo 3).
3. Zonas de estudio. Cada estado contiene un número determinado de sitios, los cuales son agrupados de acuerdo con sus características geológicas y geográficas, con la finalidad de que cada subconjunto de sitios sea una zona de estudio. Por lo cual se agruparon los sitios que se encontraban más cercanos unos de otros dentro de un área específica. Para determinar el número de zonas de estudio, se dio en función del agrupamiento de puntos dentro de cada estado. De esto, el estado de Baja California cuenta con 2 zonas, Baja California Sur con 3, Sonora con 8, y una para Sinaloa.
4. Representación gráfica. Una vez calculados los perfiles de temperatura de cada sitio, se procede a generar mapas de isotermas para profundidades de 1, 2 , 3 y 10 km, con la

finalidad de comprender el comportamiento de las temperaturas para cada zona de estudio. Los isotermas se obtendrán a través de la aplicación de métodos de interpolación.

Capítulo 6

Resultados y Discusiones

Una vez aplicada la metodología antes propuesta los resultados obtenidos de cada tarea son los siguientes:

1. Base de datos. Los datos compilados necesarios para la aplicación del método de estimación del potencial geotérmico son presentados en la Tabla 1, los cuales fueron obtenidos de reportes de perforación (Espinoza-Ojeda et al., 2023) y de la consulta del Servicio Geológico Mexicano. En la Figura 6 se muestran los sitios de flujo de calor para cada estado.

Tabla 1. Base de datos para la ampliación del método de estimación del potencial geotérmico.

Estado/Zona/ N° sitio	Conductividad Térmica (W/m°C)	Gradiente Geotérmico (°C/km)	Flujo de Calor (mW/m²)	Gradiente de Bouger (m gal)	Sedimento (m)	Elevación (m)
Baja California						
Zona BC-1						
20	2.27	34.2	68.9	117.9	1944	13
31	2.29	39.5	81.5	105.5	2636	32
18	2.36	40.6	40.6	102.6	3298	25
22	2.48	41.4	95.3	137.4	1745	808
60	3.05	16.8	51.5	137.6	4530	3
28		25.9	52.2	104.9	2551	49
30		38.5	67.0	105.5	2855	115
19	2.41	61.2	111.3	117.9	3762	13
34	2.49	43.4	80.8	105.2	500	60
Zona BC-2						
15	1.9	36.5	73.6	123.4	2657	35
17	2.21	44.9	106.1	102.6	4424	25
27	2.29	37.8	93.3	131.9	2943	0
23	2.48	46.9	116.3	99.9	985	706

21	2.26	27.6	63.7	119.6	2000	1240
24		33.2	73.3	126.4	2902	13
29		61.6	152.9	145.2	2902	8
59	2.34	14.8	2.3	141.1	5325	1
Baja California Sur						
Zona BCS-1						
1	2.86	18	51.5	51.5	1300	420
2		11.7	29.3	29.3	1900	2250
61	0.87	59.5	50.6	102.5	4530	3
11	2.39	39.8	104.6	126.2	2081	748
10	2.35	20.0	46.0	118.7	1250	540
8	2.37	94.6	224.3	128.3	2500	715
7	2.48	69	171.3	137.9	1142	706
9	2.33	133.8	311.9	118	2505	749
98	3.52	138.2	321.5	102.9	1700	264
97	2.58	92.0	217.4	108.7	1500	312
59	2.34	14.8	2.3	104.4	1749	1427
57	2.42	227	613	150.4	2750	21
97	2.58	92.0	217.4	108.7	1500	312
6	2.96	80.0	185.4	145.1	500	8
16	2.21	21.6	40.6	123.4	3220	8
104				-2.1	1794	1427
4		50.8	126.9	61.1	270	485
3	2.55	12.5	31.9	46.7	1000	1168
12	2.45	32.2	79.0	118.7	2414	740
96	2.74	83.5	221.0	115.7	900	28
Zona BCS-2						
16	2.21	21.6	40.6	123.4	3220	8
102				67.8	3000	648
99				117.1	980	165
25	2.22	25.4	47.0	147.3	2943	0
100				90.8	1300	351
26	2.11	37.8	86.2	231	2902	13
13	2.36	39.8	82.5	126.2	3016	21
14	1.19	38.3423793	79.3	159.1	2500	35
101				67	600	539
5	2.96	259.7	684.1	130.7	500	8

104				-2.1	1749	-2.1
57	2.42	227	613	150.4	2750	21
Sonora						
Zona SON-1						
43	2.5	41.7	104.2	113.8	2140	7
40	2.5	89.5	223.8	113.5	1234	7
47	2.5	36	90.1	87.4	700	0
46	2.5	94.6	236.6	93	2404	-3
39	2.5	28.7	71.7	113.1	1216	7
41	2.5	79	197.5	113.3	1439	6
45	2.5	49.7	197.5	141.1	1200	240
Zona SON-2						
48	2.5	103.1	257.8	130.4	1825	10
42	2.5	101.4	253.5	113.7	1550	6
44	2.5	197.4	493.4	114.9	1392	7
58	0.71		75	112.6	2918	181
68	4.19	28.2	68.2	145.2	2133	21
65	3.74	20.97	79.5	99.9	2089	27
Zona SON-3						
63	2.87	32.6	94.2	109.8		
70	3.98	14.4	68.2	105.2	2800	90
62	3.08	29.9	83.3	108.4	3887	69
67	4.19	30.19	83.3	104.9	2035	6
64	3.24	20.9	73.2	111.8	3500	9
73	3.89	17.2	74.1	137.3	137.4	53
89		52.4	76.6	8.7	1065	1149
Zona SON-4						
66	3.99	23.9	92.9	131.9	2188	13
90		25	31.4	-16.2	2450	1434
93		33.8	42.3	107.5	438	840
91		67.5	84.5	109.1	500	13
36		43.6	97.3	110.7	3958	11
92		98.8	123.8	107.9	500	12
84		176.7	480.7	6.4	1604	1196
88		69.3	101.7	96.7	849	334
87		15.4	25.9	80.7	3000	620
86		48	70.3	-11	1700	1522
85		20.5	60.2	73.6	1500	741
89		52.4	76.6	8.7	1149	1065

37		39.3	79.3	112.8	1442	7
Zona SON-5						
35		39.2	81.07	137.6	1700	6
37		39.3	79.36	112.8	1442	7
33		31.0	58.97	86.8	1800	10
34		43.4	80.84	139.7	900	139.7
81		41		133.1	1135	22
32		38.0	58.97	86.8	2200	10
Zona SON-6						
82		110	138.1	102.5	1630	1196
83		118	172.8	116.2	1300	214
80		41	117	138	1861	68
78			184	129.9	1957	420
79			193	140.9	2250	1960
77			117	140.9	1908	48
76	2.23	15	31	124	1820	138
75	3.04	26	57	139.5	1969	270
Zona SON-7						
35		39.2	81.0	137.6	6	1700
38	2.42	114.4	277	113	1093	7
95	1.37	86.6	147.6	93.3	1300	181
94	1.19	127.8	256.1	107.2	301.4	41
56	1.87	194	363	172.9	2117.5	36
49	1.87	187	350	153	2404.7	23
51	1.87	181	338	102.6	3298	25
Zona SON-8						
52	1.87	178	333	104.9	890	17
53	1.87	188	351	117.9	2036.7	13
54	1.87	174	329	137.4	3000	52
55	1.87	153	287	119.6	2500	53
50	1.87	201	376	164.3	2325	26
47	2.5	36	257.8	87.4	700	0
Sinaloa						
Zona SIN-1						
71	3.46	16.5	79.9	61.1	1922.2	22
74	3.04	32.8	124.3	46.7	1860.9	1168
72	2.92	24.9	75.3	72.1	1940.2	2250
69	4.24	39.8	175.0	96.5	2636	32

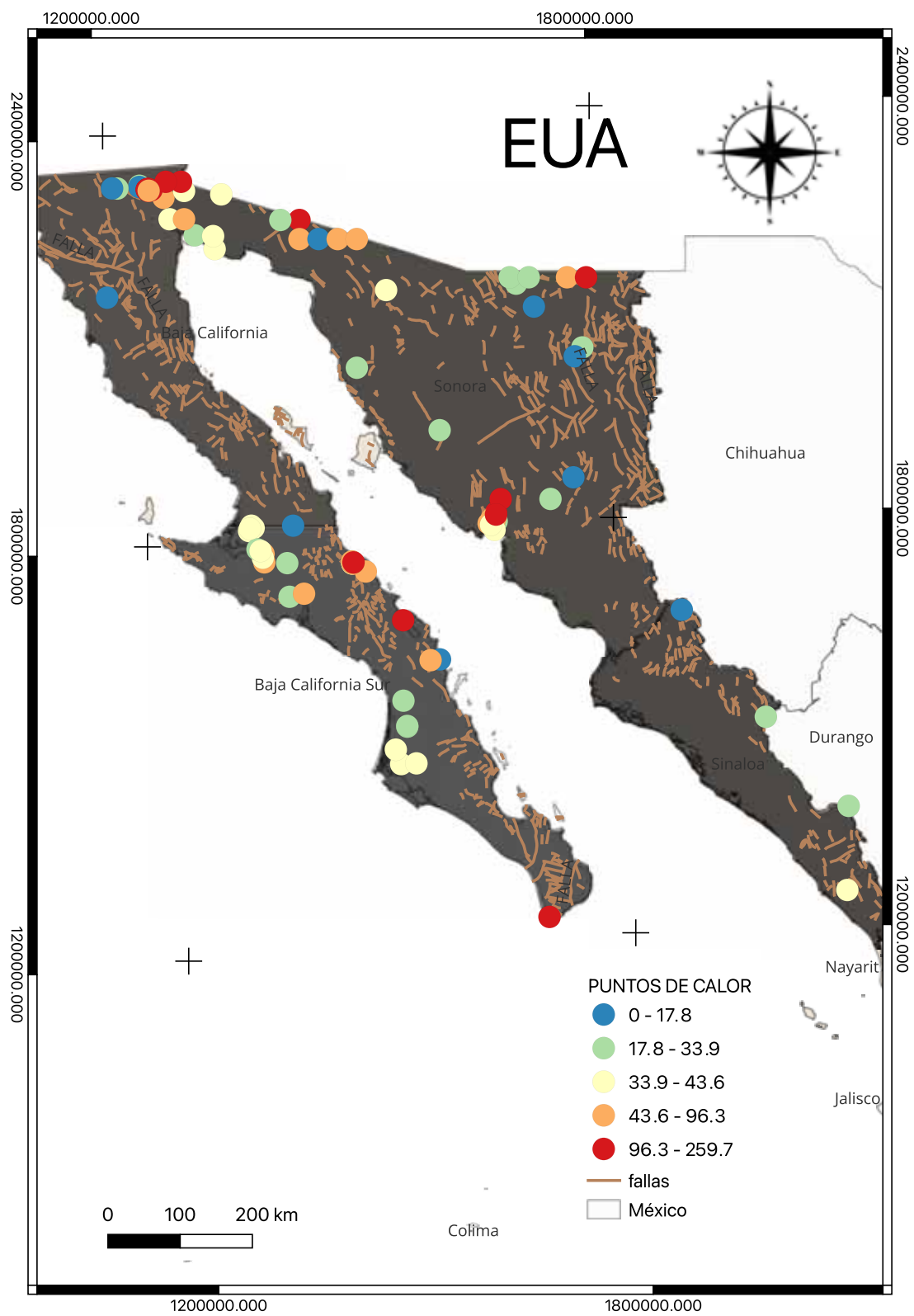


figura 6. Mapa de sitios de flujo de calor de México , constituidos por los estados de la península de Baja California , Sonora y Sinaloa

A continuación, en la Tabla 2 se enlistan las rocas más representativas de la geología regional de cada una de las zonas de estudio.

Tabla 2. clasificación de rocas representativa de la geología del área de estudio, obtenido de las cartas geológicas del Servicio Geológico Mexicano.

Estado	Tipo de roca
Península de Baja California	sedimentarias, ígneas intrusivas, volcánicas sedimentarias,
Sonora	sedimentarias, ígneas intrusivas, volcánicas sedimentarias, volcánicas continentales
Sinaloa	sedimentaria, ígneas vulcano sedimentarias

Desafortunadamente, no existe información directa sobre las propiedades termofísicas de las rocas que conforman el subsuelo de cada sitio en estudio. Por lo tanto, para determinar la conductividad térmica de las rocas, se consultaron bases de datos internacionales donde publicaron valores promedio para cada roca o tipo de litología. En la Tabla 3 se resumen los valores utilizados en este trabajo de investigación; en la cual se menciona el tipo de litología, si pertenece a Sedimentos (S) o Basamento (B), el valor promedio de la conductividad térmica, y, por último, el valor promedio de la generación de calor (Beardsmore, 2019).

Tabla 3. clasificación de rocas, características y valores promedio de la conductividad térmica y generación de calor.

Tipo de litología	S/B	K $\pm$ d.s. (W/m°C)	A (μ W/m ³)
roca de sedimentación mixta	S	2.73 $\pm$ 1.14	1.0
Roca plutónica básica	B	2.70 $\pm$ 0.50	0.2
Roca volcánica básica	S	1.75 $\pm$ 0.64	0.2

En la figura 7, podemos apreciar la distribución de las zonas de estudio que se dividieron dentro de cada una de las áreas a estudiar, esto con el motivo de trabajar de mejor manera los datos, al crear subdivisiones dentro de las áreas de estudio, permite realizar la comparación del comportamiento de cada subárea, para lograr descifrar el potencial presente.

Cada una de las subáreas se le dio un nombre correspondiente a cada uno de los estados, es por esto por lo que cada uno de los polígonos en tono morado presentes en la figura 7, representa cada una de estas subáreas por ejemplo podemos tomar el estado de Sinaloa el cual solo cuenta con área a la que se llamó SIN-1 de igual manera a si fue en cada uno de los estados .

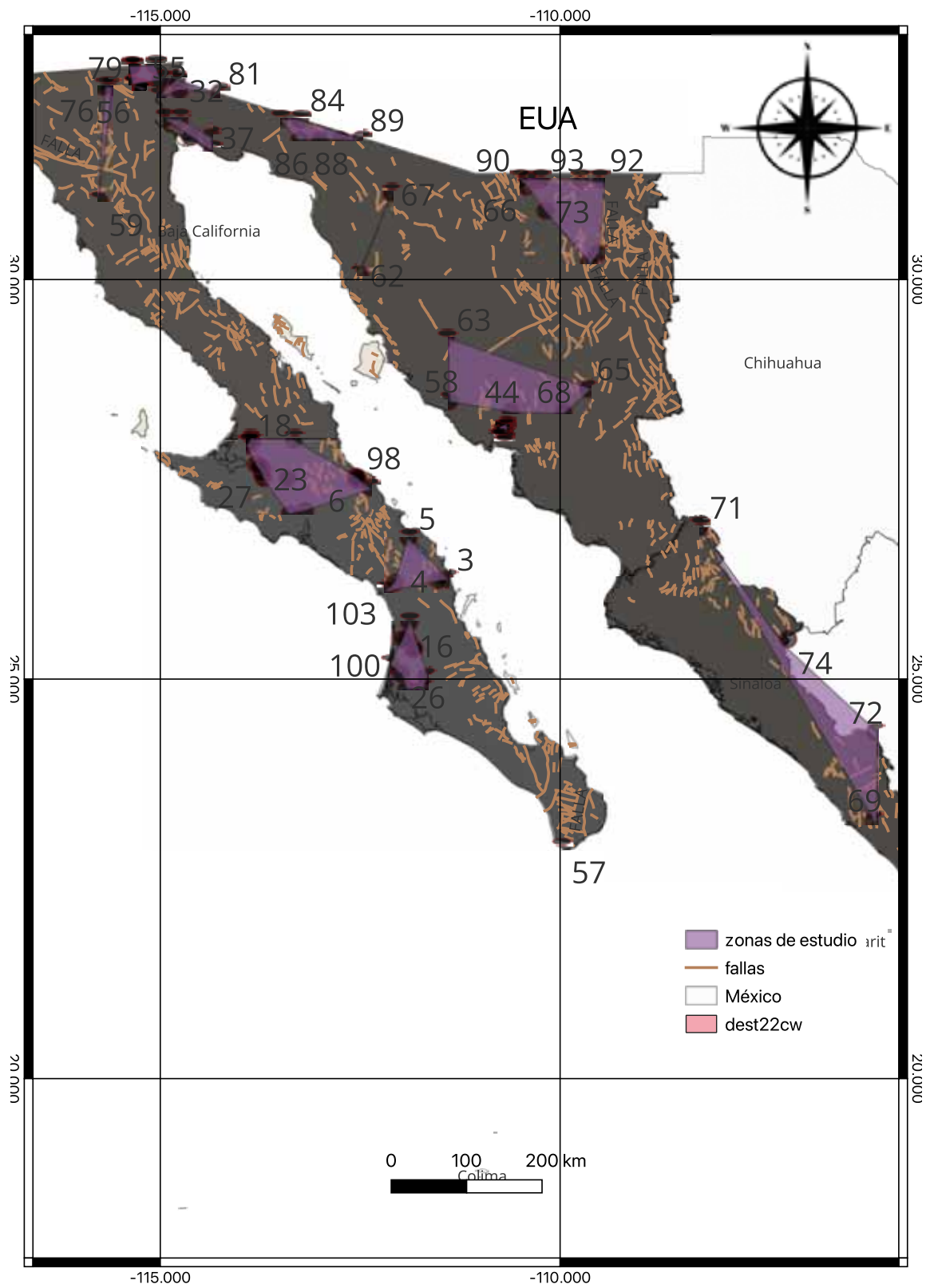


figura 7. Mapa de ilustración de zonas de estudio dentro de los estados de la península de Baja California, Sonora y Sinaloa.

En la Figura 8 se muestra el mapa del área de estudio con la distribución del espesor del sedimento, usando datos incluidos en el software libre GeoMapApp, así como los sitios analizados. Esto con la finalidad de determinar el espesor del sedimento en cada sitio. Para reforzar los datos del GeoMapApp, se analizaron los perfiles estratigráficos disponibles de los sitios, así como información del Servicio Geológico Mexicano.

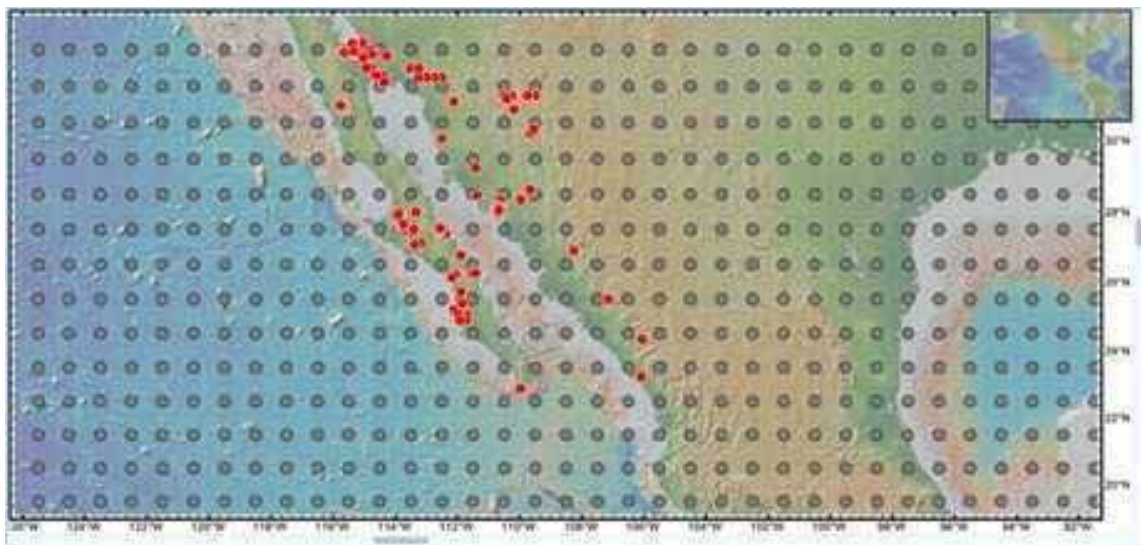


figura 8. Mapa de los sitios analizados (círculo rojo) y de los puntos de valores promedio del espesor del basamento (círculo gris).

Figura 8. se observan los puntos donde se calculó el valor promedio del espesor del basamento (círculo gris). Estos valores fueron obtenidos a través del software libre CRUST 1.0 (Laske et al., 2013) e incluidos en la base de datos del GeoMapApp (Ryan et al., 2009). También se incluyen los sitios de estudio (círculo rojo), de los cuales, considerando su ubicación entre los puntos del espesor del basamento, se interpolaron estos valores para obtener un promedio para cada sitio.

En la Figura 9 se presenta el mapa del gradiente de Bouguer (mGal) y los sitios bajo estudio. En este caso, de los datos reportados por GeoMapApp, se logró obtener el gradiente de Bouguer para cada sitio de acuerdo con sus coordenadas.

Finalmente, los datos analizados y representados en las Figuras 6-8, fueron incluidos en la Tabla 1.

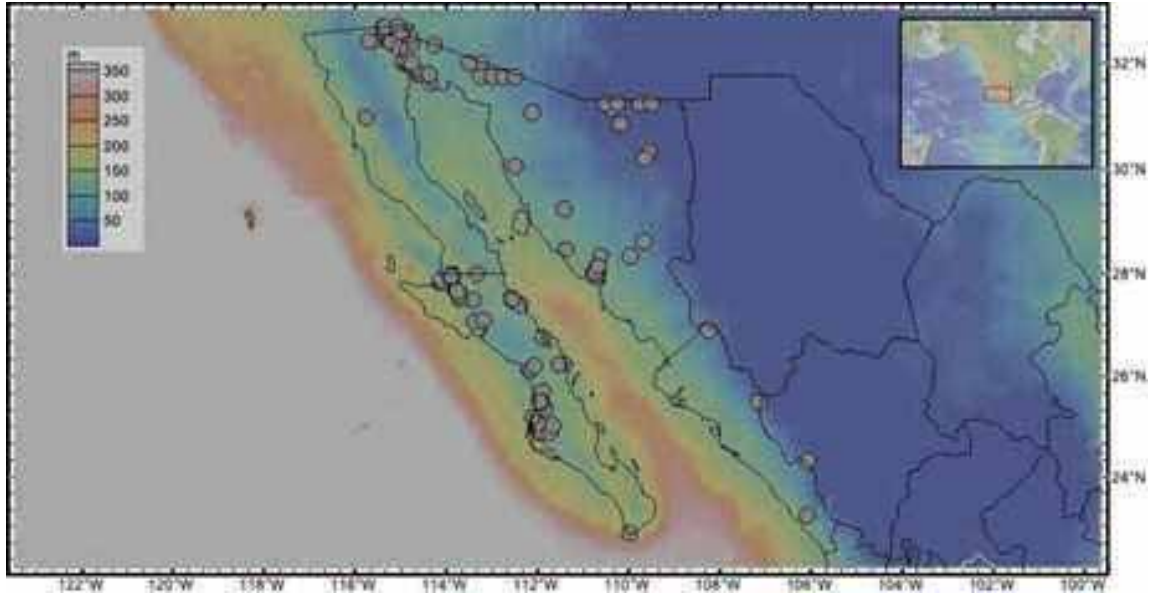


figura 9. Mapa del gradiente de Bouguer(mGal), incluyendo los sitios de estudio.

2. Estimación del potencial geotérmico. Una vez aplicada la metodología propuesta por Beardsmore (2019) para el cálculo del potencial teórico geotérmico de un sistema EGS, se obtuvieron los perfiles de temperatura del subsuelo para cada sitio, es decir, T_S y T_B . En la Tabla 4, se resumen las temperaturas T_X (Ecuación 12) calculadas para las profundidades 1000, 2000 y 3000 metros, obtenidas en función de las T_S y T_B .

Tabla 4. Resumen de temperaturas obtenidas al aplicar la ecuación 12(TX) en cada uno de los puntos correspondientes de las diferentes zonas estudiadas.

Estado/Zona	Profundidad (m)	T _x (°C)
Baja California		
Zona BC-1	1,200	114.87
	2000	161.55
	3000	208.27
Zona BC-1.1	2500	132.6
	3000	218.96
Zona BC-1.2	2500	426.4
	3000	451
Zona BC-1.3	1200	169.47
	2000	247.99
	3000	326.53
Zona BC -2	2000	64.9
	3000	76.51
Zona BC-2.1	2500	119.17
	3000	145.42
Zona BC-2.2	1000	35.9
	2000	46.51
	3000	57.1
Zona BC- 2.3	1900	140.31
	2000	187.69
	3000	242.11
Baja California Sur		
Zona BCS-1	1900	130.94
	2000	173.29
	3000	240.53
Zona BCS-1.1	1000	96.03
	2000	197.09
	3000	278.15

Zona BCS- 1.2	1000	81.17
	2000	112.99
	3000	144.8
Zona BCS-1.3	1000	37.87
	2000	45.7
	3000	53.53
Zona BCS- 2	1400	109.88
	2000	146.74
	3000	183.61
Zona BCS-2.1	1800	59.49
	2000	73.87
	3000	88.27
Zona BCS- 2.2	1200	42.49
	2000	55.36
	3000	68.24
Zona BCS-2.3	2000	409.7
	3000	499.46
Zona BCS-3	2000	301.87
	3000	374.32
Sonora		
Zona SON-1	1700	39.39
	2000	51.91
	3000	64.52
Zona SON-1.1	2800	105.05
	3000	141.12
Zona SON -1.2	1000	54.16
	2000	85.03
	3000	115.9
Zona SON-2	1000	111.41
	2000	177.81
	3000	279.24
Zona SON -2.1	1000	77
	2000	127.87

	3000	178.74
Zona SON -2.2	1000	107.99
	2000	187.99
	3000	267.99
Zona SON- 2.3	1000	77.76
	2000	128.63
	3000	179.5
Zona SON-3	1000	71.2
	2000	115.11
	3000	159.03
Zona SON -3.1	1300	59.77
	2000	78.81
	3000	122.73
Zona SON-3.2	1200	57.4
	2000	70.08
	3000	92.75
Zona SON-3.3	1000	57.4
	2000	75.08
	3000	92.75
Zona SON-3.4	1600	66.27
	2000	102.78
	3000	139.3
Zona SON-3.5	1500	47.57
	2000	51.06
	3000	58.31
Zona SON-4	1600	55.39
	2000	82.33
	3000	109.29
Zona SON- 4.1	1700	261.78
	2000	470.46
	3000	679.16
Zona SON-4.2	1400	71.92
	2000	146.7
	3000	221.48
Zona SON- 4.3	1000	71.58
	2000	131.58
	3000	191.58

Zona SON-4.4	1200	65.62
	2000	125.62
	3000	185.62
Zona SON- 5	2300	72.58
	3000	76.83
Zona SON-5.1	1000	40.22
	2000	69.78
	3000	99.34
Zona SON-5.2	1000	53.51
	2000	83.07
	3000	112.64
Zona SON-5.3	1600	65.5
	2000	77.1
	3000	117.1
Zona SON-5.4	1400	56.19
	2000	73.85
	3000	108.2
Sinaloa		
Zona SIN-1	1300	69.49
	2000	145.54
	3000	221.65
Zona SIN-1.1	1800	53.98
	2000	107.89
	3000	161.8
Zona SIN-1.2	1000	50.74
	2000	83.28
	3000	115.89
Zona SIN-1.3	1000	47.89
	2000	82.17
	3000	116.52

3. Áreas de estudio. Al obtener los datos de temperaturas por medio de la ecuación 12, se procedió a hacer una representación gráfica del comportamiento de las temperaturas,

dentro del rango desde los 100 m hasta la capa limite sedimento – basamento el cual comprende hasta los 3 Km.

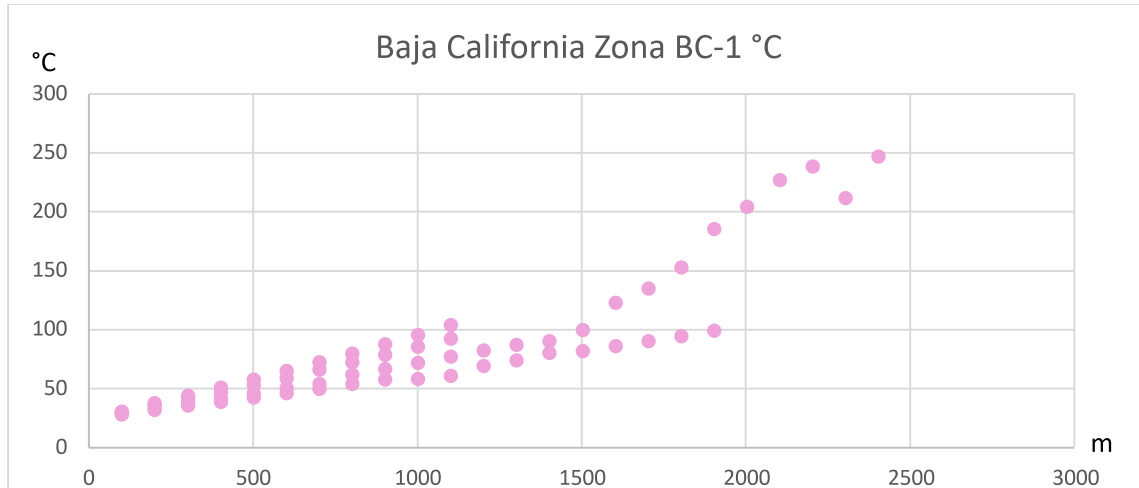


figura 10. representación gráfica del cambio de temperaturas con respecto a la profundidad en la zona BC-1 de Baja California.

Como ejemplo, en la figura 10 se muestra el comportamiento obtenido del perfil de temperaturas con relación a la profundidad de la zona BC-1, considerando como referencia la capa de limite sedimento – basamento, en el cual la temperatura más alta calculada alcanzo 246° una profundidad de 2400m. Por otra parte, podemos notar que la diferencia en el comportamiento de las temperaturas empieza a ser más evidente a partir de los 600m.

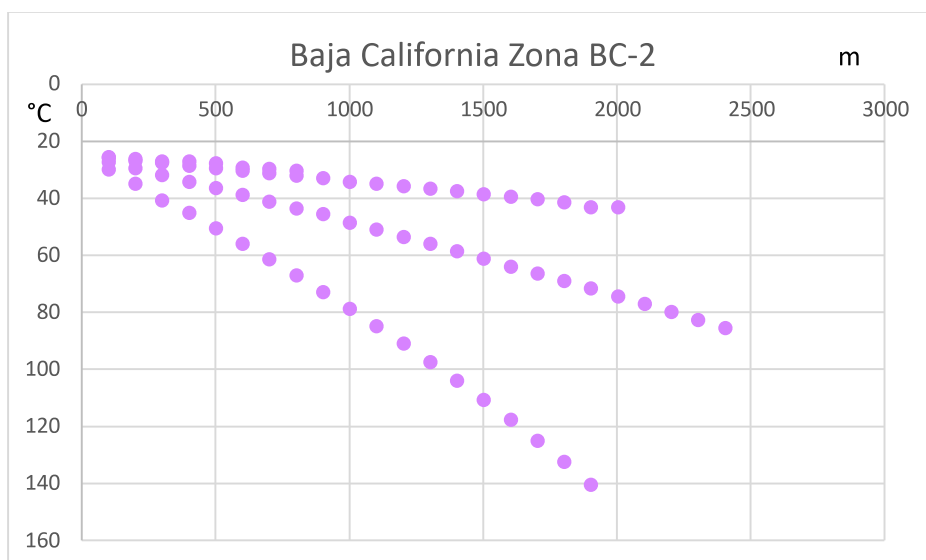


figura 11. perfiles de temperaturas de los sitios correspondientes a la zona BC-2 de Baja California.

En la figura 11 podemos observar que en dos sitios se presentó una similitud de temperaturas en los primeros 800m; en esta zona la temperatura más alta registrada fue de 140°C con una profundidad de 1900m.

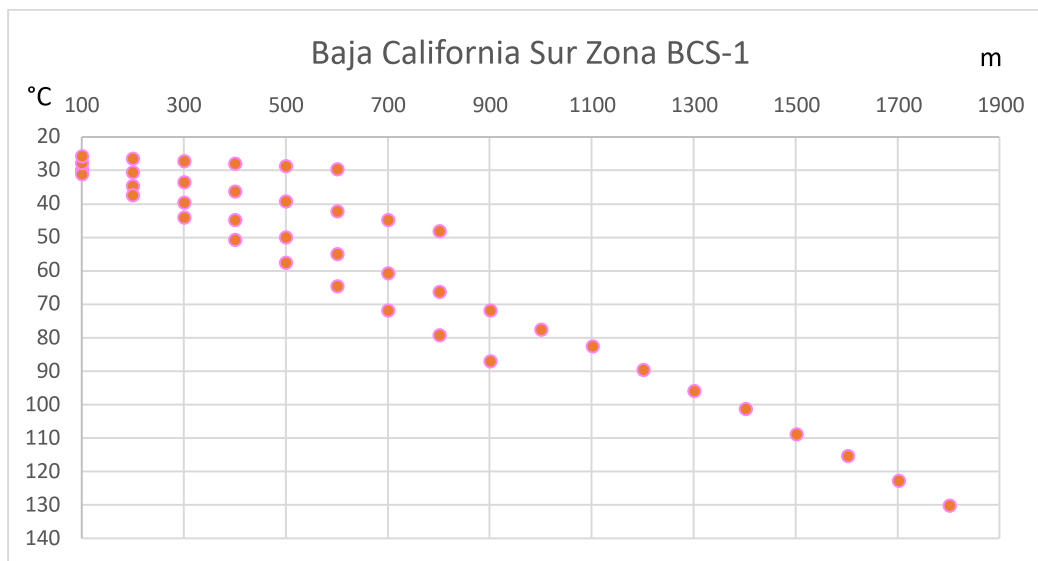


figura 12. Perfil de temperaturas de la Zona BCS-1 de Baja California Sur.

En el caso de la zona BCS-1 de Baja California Sur (figura 12) se observó un comportamiento de temperaturas más bajas en relación con otras zonas, esto se debió principalmente al gradiente geotérmico presente en esa área.

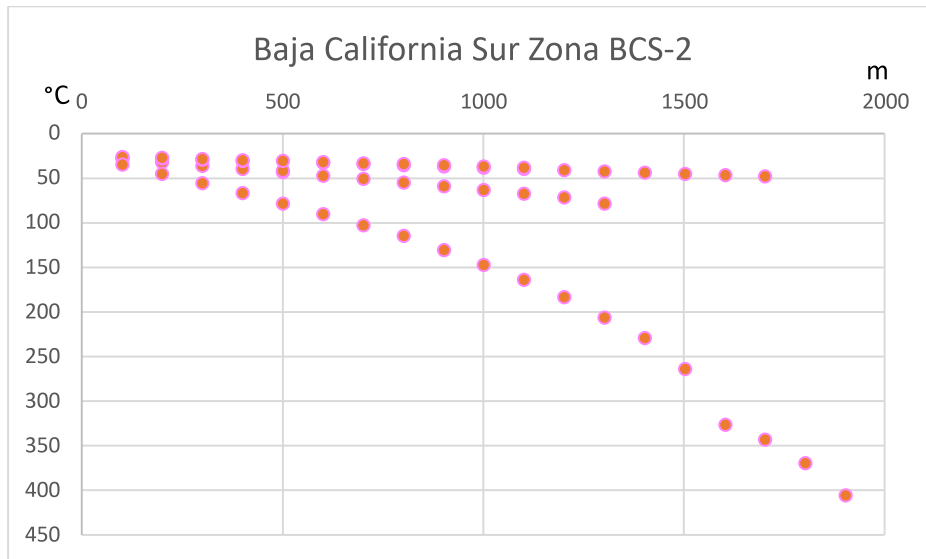


figura 13. perfil de temperaturas de la zona BCS-2 de Baja California Sur.

Con respecto a las zonas BCS-2 y BC-3 (figura 13 y 14), son un claro ejemplo de las diferencias entre los sitios, distanciados por 10.380 km² y ~ km, respectivamente; en los cuales algunos presentan evidente anomalía térmica “fría” y “caliente”, de acuerdo con las bajas y altas temperaturas alcanzadas en profundidad, respectivamente.

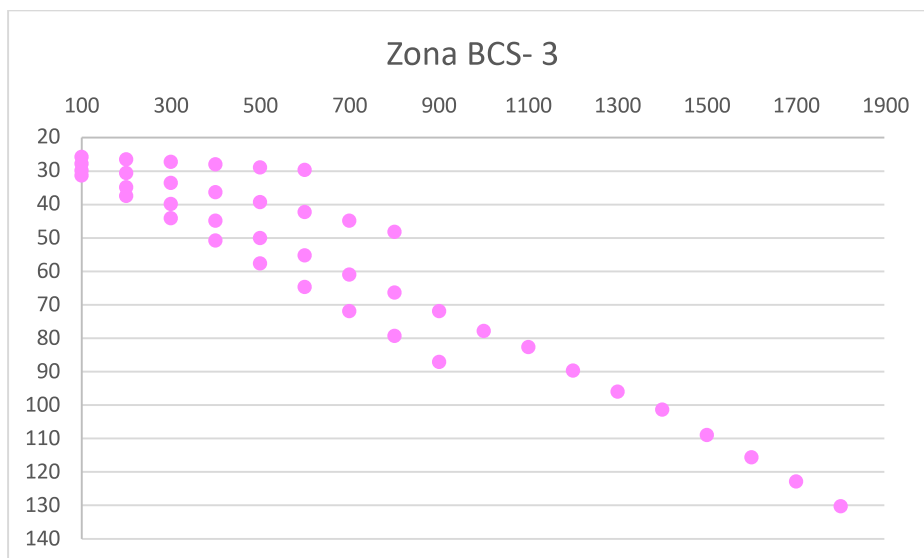


figura 14. perfil de temperaturas de la zona BCS-3, perteneciente al estado de Baja California Sur.

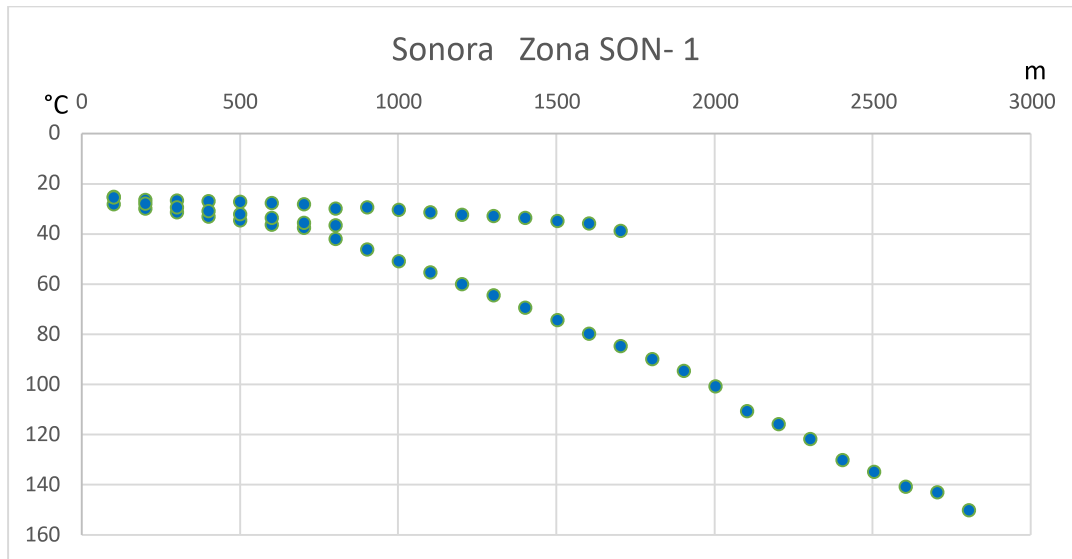


figura 15. perfil de temperaturas de la zona Son-1 del estado de Sonora.

Otro caso de sitios con muy bajas temperaturas es la zona SON-1, como se puede observar en la figura 15, a excepción de un sitio, el cual logró un máximo de 150°C a los 2800m.

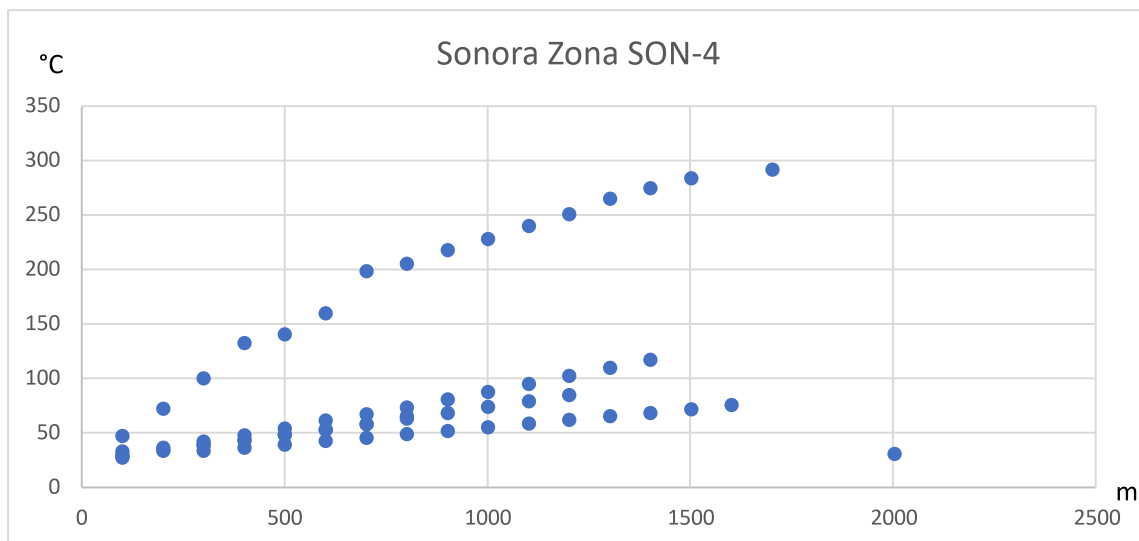


figura 16. perfil de temperaturas de la zona Son-4 del estado de Sonora.

Caso opuesto dentro del estado de Sonora, es la zona SON-4 (figura 16), en la cual se estimaron temperaturas relativamente altas, con valores rondando los 100°C en aproximadamente 1500m de profundidad.

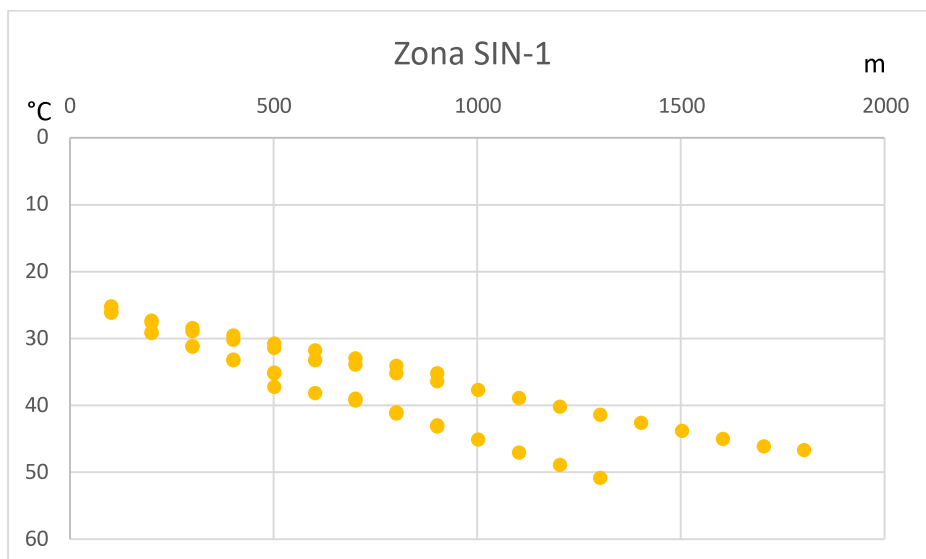


figura 17. perfil de temperaturas de los sitios pertenecientes a la zona Sin-1 del estado de Sinaloa.

Por último, el caso de la zona SIN-1, en la cual sus sitios son de muy baja temperatura como se observa en el gráfico de la figura 17, estimando temperaturas máximas de 50°C entre 1300 y 2000m de profundidad.

A continuación, en la Tabla 5 se muestran las temperaturas calculadas T_x para cada sitio de las diversas zonas de estudio. Estos resultados consideran las temperaturas obtenidas desde los cuatro hasta los diez km. Posteriormente, las temperaturas estimadas son usadas como datos de entrada en las ecuaciones 14 y 15, las cuales son para estimar el potencial teórico y técnico, respectivamente. Por lo tanto, en la Tabla 6 se muestran los potenciales calculados para cada zona de estudio.

Tabla 5. perfiles de temperatura para profundidad desde cuatro hasta diez kilómetros.

Zona	T_x	citio
BC-1		
4	254.99	mex-0016
5	301.71	mex-0016
6	348.43	mex-0016
7	395.15	mex-0016
8	441.87	mex-0016
9	488.59	mex-0016
10	535.31	mex-0016
4	262.14	mex-0017
5	305.32	mex-0017
6	348.5	mex-0017
7	391.68	mex-0017
8	434.86	mex-0017
9	478.04	mex-0017
10	521.22	mex-0017
4	313.12	mex-0018
5	361.68	mex-0018
6	410.24	mex-0018
7	458.8	mex-0018
8	507.36	mex-0018
9	555.92	mex-0018
10	604.48	mex-0018
4	405.07	mex-0019
5	483.61	mex-0019
6	562.15	mex-0019
7	640.69	mex-0019
8	695.47	mex-0019
9	750.34	mex-0019
10	805.21	mex-0019
Zona BCS-1		
4	304.8	mex0120
5	369.08	mex0120
6	433.35	mex0120

7	497.62	mex0120
8	561.9	mex0120
9	626.18	mex0120
10	690.46	mex0120
4	359.21	mex0121
5	440.27	mex0121
6	521.33	mex0121
7	602.39	mex0121
8	683.45	mex0121
9	764.51	mex0121
10	845.57	mex0121
1	81.17	mex0004
2	112.99	mex0004
3	144.8	mex0004
4	158.91	mex0004
5	169.36	mex0004
6	182.42	mex0004
7	198.08	mex0004
8	216.35	mex0004
9	237.23	mex0004
10	260.71	mex0004
4	89.1	els2
5	124.67	els2
6	160.24	els2
7	195.81	els2
8	231.38	els2
9	266.95	els2
10	302.52	els2
Zona SON-1		
1	39.39	mex0002
2	51.91	mex0002
3	64.52	mex0002
4	76.95	mex0002
5	89.46	mex0002
6	101.98	mex0002
7	114.52	mex0002

8	127.01	mex0002
9	139.53	mex0002
10	152.05	mex0002
1	68.96	mex0098
2	105.05	mex0098
3	141.12	mex0098
4	177.21	mex0098
5	213.3	mex0098
6	249.39	mex0098
7	285.48	mex0098
8	321.57	mex0098
9	357.66	mex0098
10	393.75	mex0098
1	54.16	mex0075
2	85.03	mex0075
3	115.9	mex0075
4	146.77	mex0075
5	177.64	mex0075
6	208.51	mex0075
7	239.48	mex0075
8	270.35	mex0075
9	301.22	mex0075
10	332.09	mex0075
zona SIN-1		
1	69.49	Mal
2	145.54	Mal
3	221.65	Mal
4	297.62	Mal
5	373.62	Mal
6	449.62	Mal
7	525.73	Mal
8	601.73	Mal
9	674.84	Mal
10	750.95	Mal
1	53.98	Tay
2	107.89	Tay

3	161.8	Tay
4	215.88	Tay
5	270.38	Tay
6	325.28	Tay
7	379.78	Tay
8	426.4	Tay
9	471.33	Tay
10	510.18	Tay
1	50.74	Tam
2	83.28	Tam
3	115.89	Tam
4	147.73	Tam
5	179.76	Tam
6	211.85	Tam
7	243.09	Tam
8	276.02	Tam
9	308.1	Tam
10	340.19	Tam
1	47.89	CX
2	82.17	CX
3	116.52	CX
4	148.72	CX
5	180.92	CX
6	212.94	CX
7	244.96	CX
8	277.16	CX
9	309.18	CX
10	431.2	CX

Para la tabla 5, se colocaron las temperaturas reportadas a partir de la capa basal hasta llegar a la profundidad máxima tomada la cual fueron los 10km, en algunas de las zonas se reportaron las temperaturas desde el 1km, esto al ser zonas donde su capa basal comenzó a 1km de profundidad,

Tabla 6. valores estimados para el potencial teórico y potencial técnico para cada una de las zonas estudiadas

Potencial Técnico (EJ/Km ²)	Potencial Teórico (MW/km ²)	Zona
136.39	235.77	Zona BC-1
1.98	946.04	Zona BC-2
0.128	13.12	Zona BCS-1
3.66	1659.76	Zona BCS-2
878.41	441062.10	Zona BCS- 3
53065.75	223579.75	Zona Son-1
27.86	12663.63	Zona Son-2
493.31	232575.32	Zona Son-3
198.91	77166.98	Zona Son-4
226.08	91292.34	Zona Son- 5
1625.52	192450.52	Zona Sin-1

En la tabla 6, podemos observar los valores obtenidos de la aplicación de las ecuaciones de potencial eléctrico y el potencial teórico, los resultados obtenidos de estos cálculos fueron obtenidos dentro del rango determinado para cada una de las zonas de estudio.

Primero se calculó el potencial eléctrico o potencial técnico que se obtuvo en cada área Demostrando que el área de Son-1 fue la que mayor potencial obtuvo, esto podemos verlo de nueva cuenta en el potencial teórico.

Sin embargo, tanto el estado de Sonora como el estado de Baja California Sur, fueron los dos estados con mayor potencial técnico como teórico, demostrando que estos valores obtenidos, tienen grandes relaciones con los valores obtenidos a nivel estado en el estudio realizado en el trabajo de iglesias et. al . (2016)., pero en el caso de este estudio sus profundidades máximas tomadas fueron un rango entre los 5 y 6km de profundidad es por esto por lo que al tomar nosotros 10km de profundidad de pueden llegar a ver cambios significativos en los valores obtenidos.

Además, que los valores de celdas que se tomaron en este trabajo fueron de mayor amplitud esto con la finalidad de poder tomar los puntos que se encontraban más retirados de un área.

Lo cual dio como resultado áreas de trabajo más amplias.

Por otra parte, los valores del potencial teórico, se manejó como el potencial que podría obtener cada una de las áreas de estudio, y en una comparación con el trabajo realizado por Iglesias et. al. (1016) los valores obtenidos están dentro de un rango similar, espetando el hecho de que ellos lo obtuvieron por nivel estado y en caso de este trabajo fue por áreas dentro de cada estado.

Dando, así como resultado el potencial posible dentro de chicas Zonas, aparte de que el cálculo obtenido fue a una mayor profundidad.

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 5, a continuación, se presentan los mapas de interpolación de las temperaturas correspondientes a las profundidades de 1, 3 y 10 km.

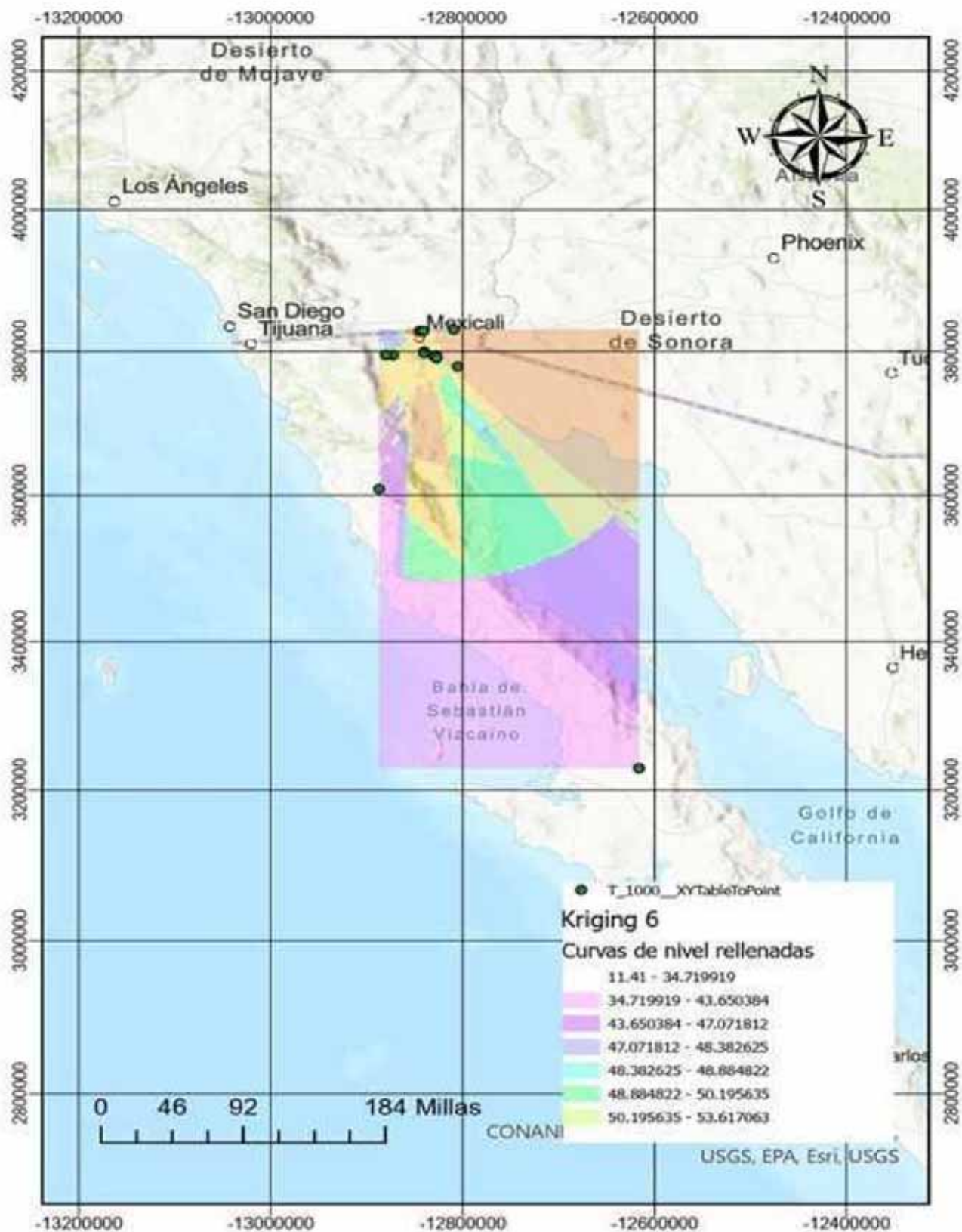


figura 18. Mapa kriging del estado de Baja California a 1km de profundidad.

En la figura 18 se aprecia el comportamiento de las temperaturas registradas a la profundidad de un kilómetro, en las cuales se obtuvo por realizar un sistema de interpolación kriging, el cual registra el comportamiento de las temperaturas de manera superficial, con ayuda de la simbología en el sistema de rampa de temperaturas obtuvimos que las temperaturas más bajas obtenidas están representadas en tonalidades color rosa, y las altas en verde limón.

Para este caso las temperaturas obtenidas, van en un rango desde los 34° hasta los 53° aproximadamente esto siendo obtenido al momento de realizar la interpolación de los datos de temperaturas calculadas anteriormente



figura 19. mapa de interpolación de las temperaturas a 3km de profundidad.

para el caso de la figura 19 se realizó una interpolación para las temperaturas calculadas a los 3km de profundidad, en comparación con las temperaturas a 1km de profundidad se registró un aumento de temperaturas considerablemente esto al tener su temperatura máxima a 154°, se aprecia que la zona con mayor índice de temperaturas altas es la zona norte.

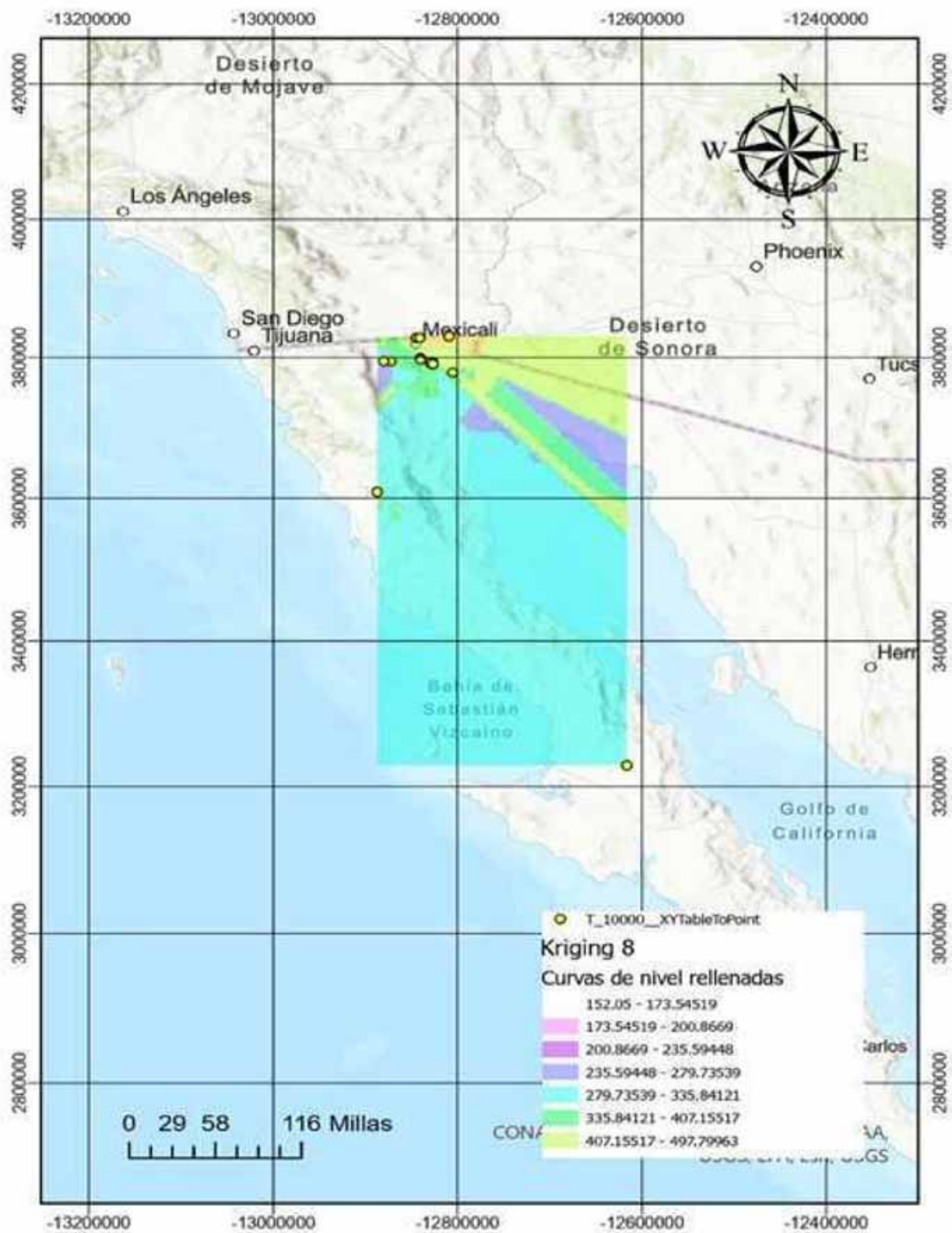


figura 20. mapa kriging del estado de Baja California a 10km de profundidad.

Para el caso de los 10km el espectro de color fue más amplio en el rango de las temperaturas de los 279°- 335° aunque la mayor fue de 407°, esto tomado en cuenta que fue un rango obtenido al momento de realizar la interpolación.

En cuanto a su comportamiento en comparación con las temperaturas registradas a 1km y 3km fue bastante, ejemplificando en el caso de 1km su aumento podría ser casi del 100% esto debido a que la temperatura máxima a esa profundidad fue de 50.19° y a los 10km fueron 407.15°, en el caso de los 3km fueron 154° lo cual podría decirse que de los 3 a los 10km tuvo un aumento total de 253.01°, esto reporta que tiene un potencial favorable para la explotación del recurso esto como respuesta a las temperaturas obtenidas anteriormente.

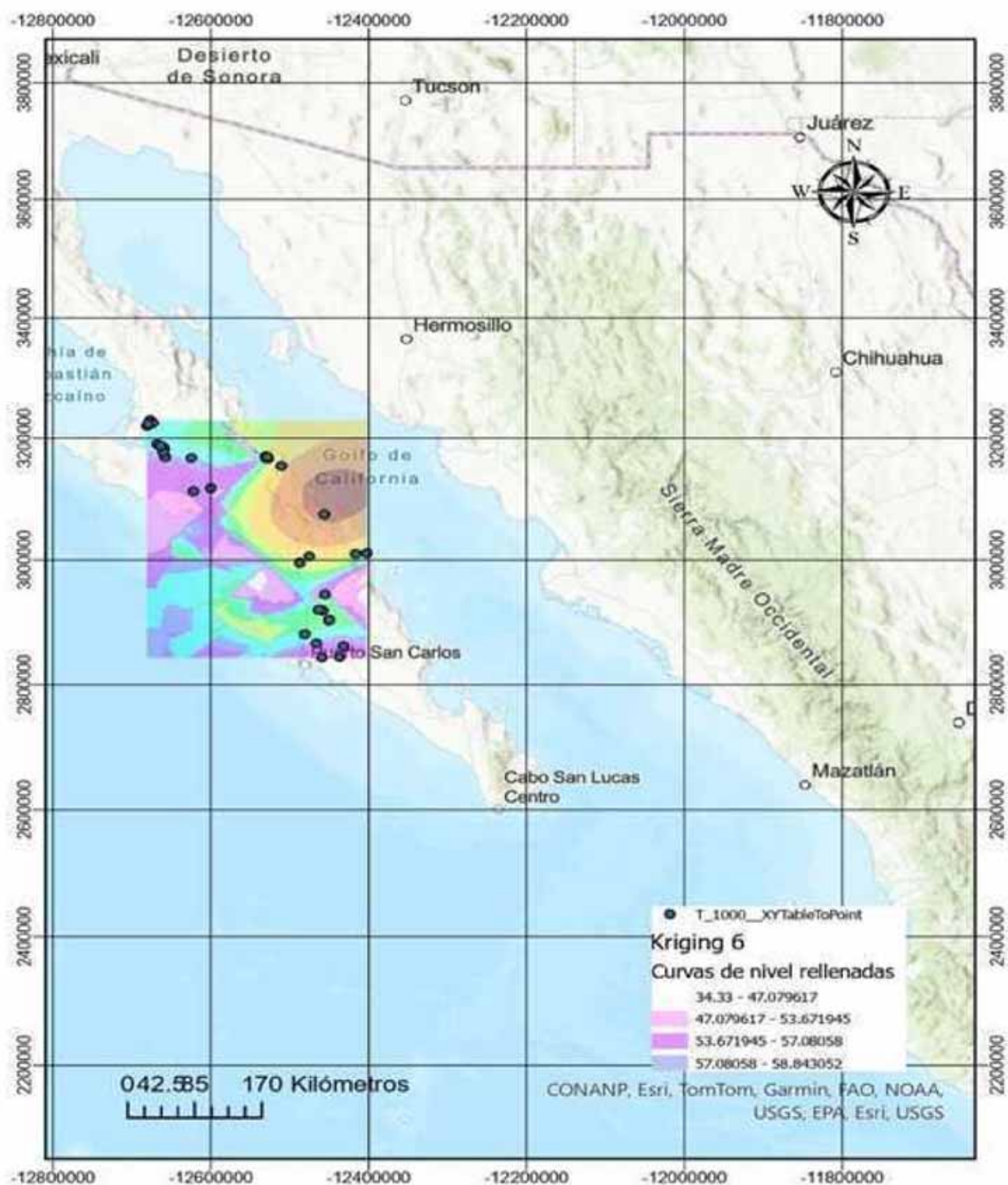


figura 21. mapa kriging a 1km de profundidad correspondiente al estado de Baja California Sur.

En el caso de Baja California Sur, en la zona BCS-2, es donde se registraron las temperaturas más altas esto también se vio reflejado al momento de obtener sus potencial teórico y técnico, se demostró que esta zona junto con la zona BCS-3 fueron de las áreas con mayor potencial a diferencia del estado de Baja California, su comportamiento de las temperaturas fue más alto.

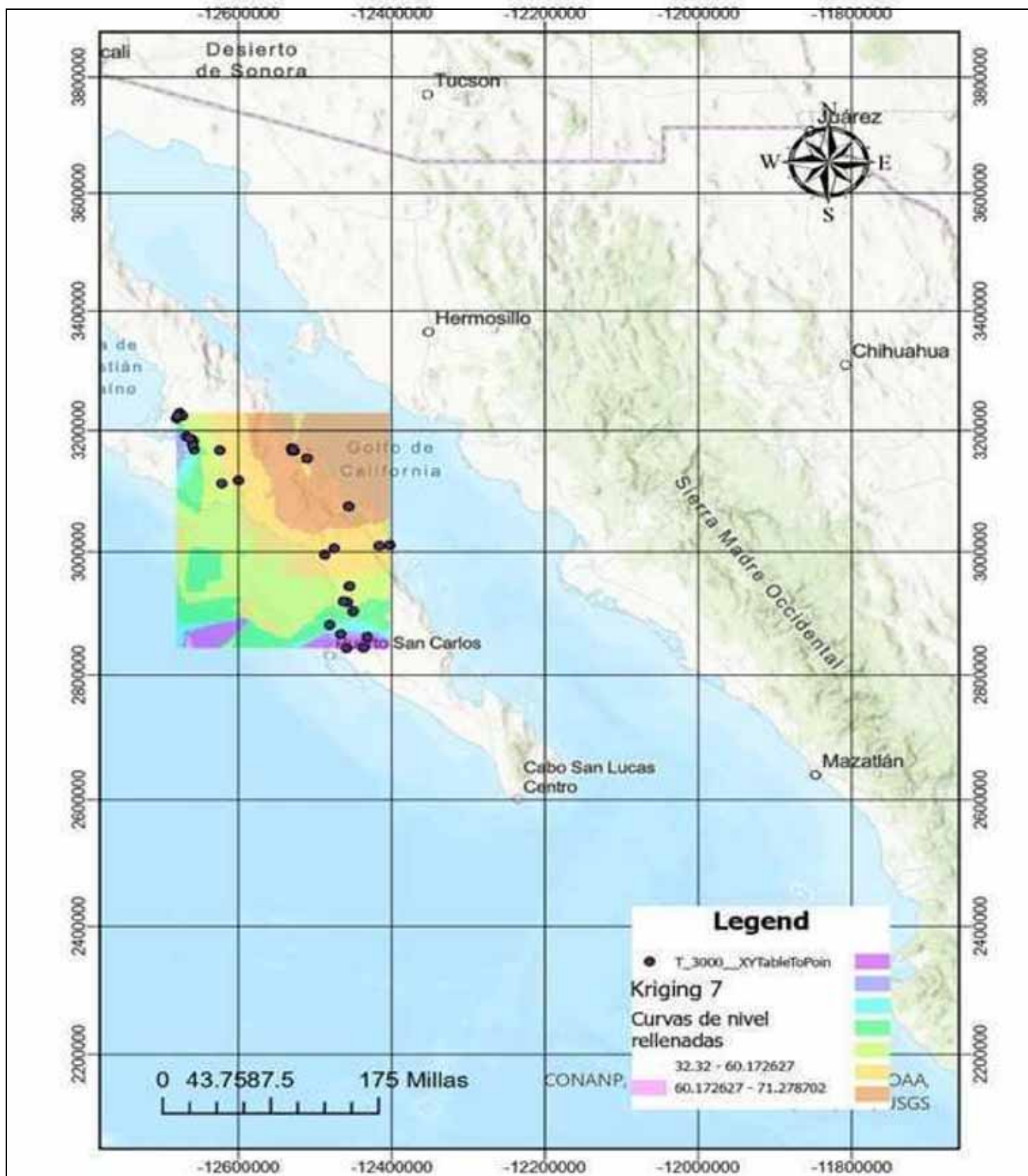


figura 22. mapa kriging del estado de Baja California Sur a 3km de profundidad.

para el caso del kriging a los 3km de profundidad se aprecio un aumento de las temperaturas considerable en comparacion con el de las obtenidas en el primer kilometro en este caso, la aglomeracion de temperaturas mas altas se comenzo a centrar, con direccion a la zona Noroeste

a comparacion de las temperaturas registradas en el primer kilometro se nota un aumento mas aplo en las zonas BCS-3 Y BCS-1 lo cual podria deberse a la distribucion del calor almacenado en esas profundidades.

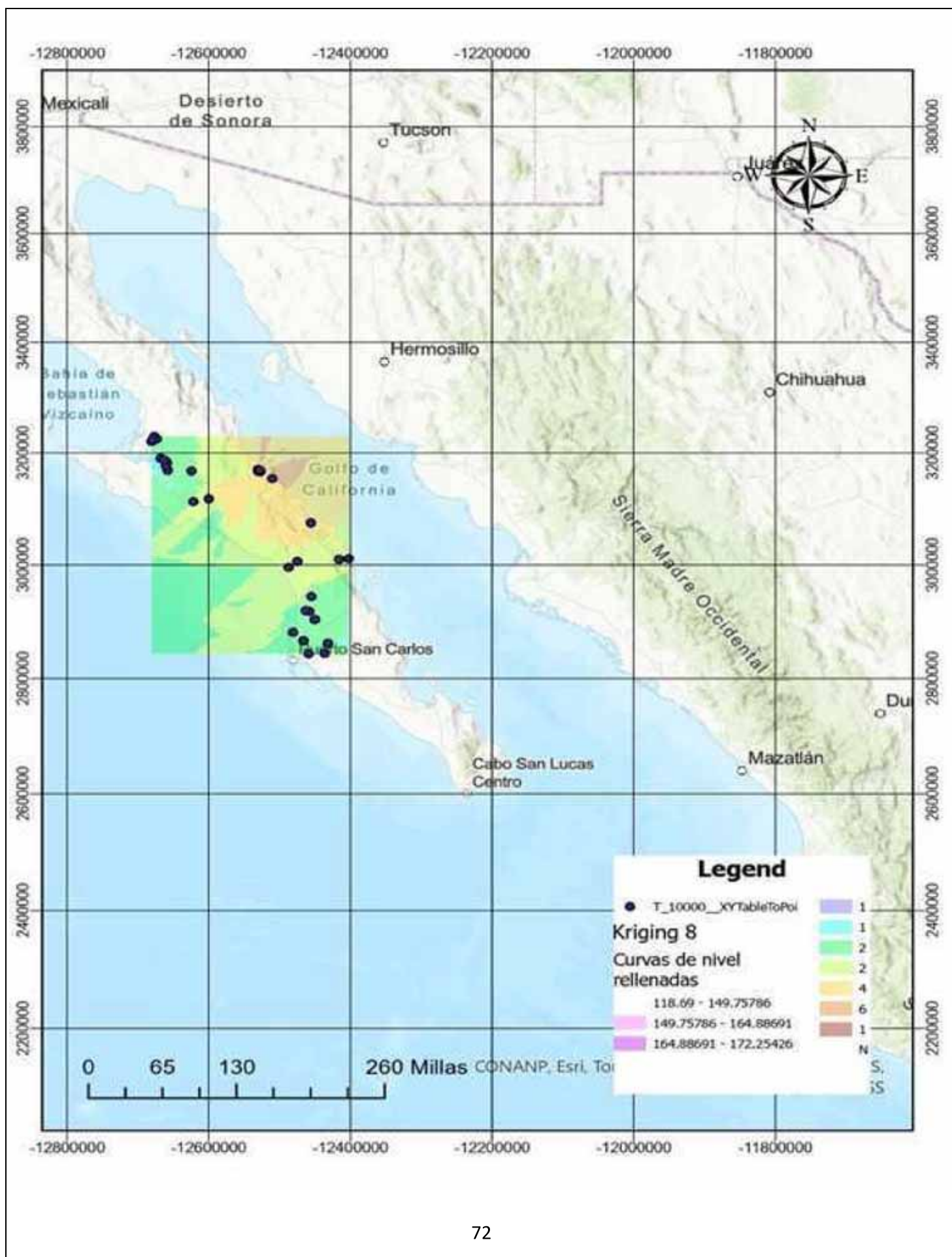


figura 23. mapa kriging a 10km correspondiente al estado de Baja California Sur.

En el caso de las temperaturas obtenidas a los 10km de profundidad se nota un cambio muy amplio en comparación con las obtenidas en los límites superiores, esto debido a que los límites superiores hay una distribución más amplia de rangos de temperaturas, por otra parte a esta profundidad se contempla un comportamiento muy diferente obteniendo un comportamiento de temperaturas más homogéneo.

En comparación con los datos obtenidos en las profundidades anteriores, se deduce que al llegar a esta profundidad, y con respecto a que la mayoría de las zonas comparten componentes geológicos, y elevaciones un tanto similares, resulta una parte importante para comprender el comportamiento de las temperaturas esa profundidad.

Es por esto que en los primeros kilómetros las temperaturas presentaron un comportamiento más variable, esto puede ser en parte a la composición geológica de las zonas, sabiendo que están presentes cerca de zonas con fallas, quizá estas fallas en algunos puntos sean profundas, dando como resultados estas temperaturas más altas.

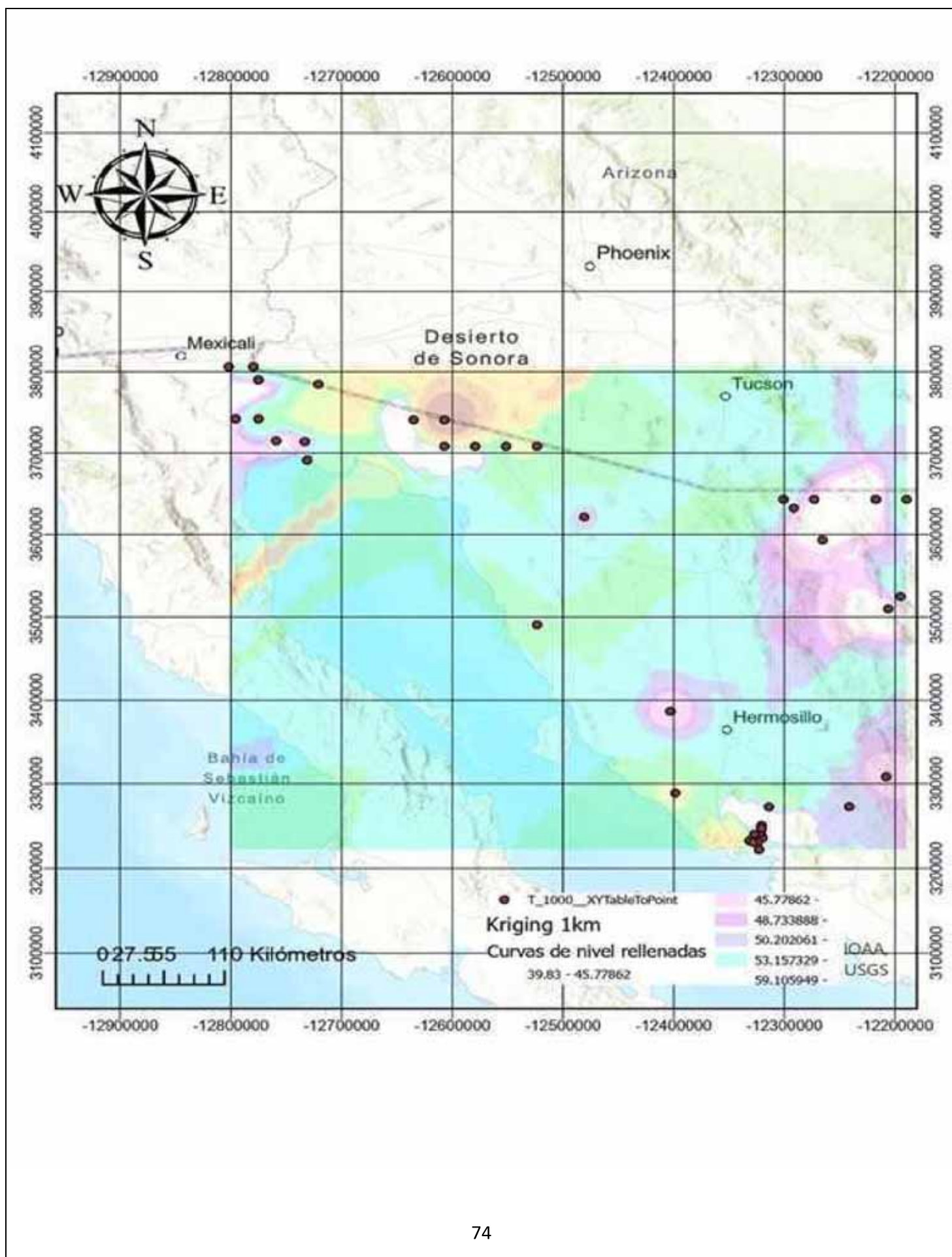


figura 24. mapa kriging a 1km de profundidad correspondiente al estado de Sonora

En la figura 24, se aprecia el resultado de la interpolación de los datos obtenidos en el primer kilómetro, en este caso se observa que las mayores temperaturas obtenidas en la zona SON-1, SON-6 y parte de la zona SON-7

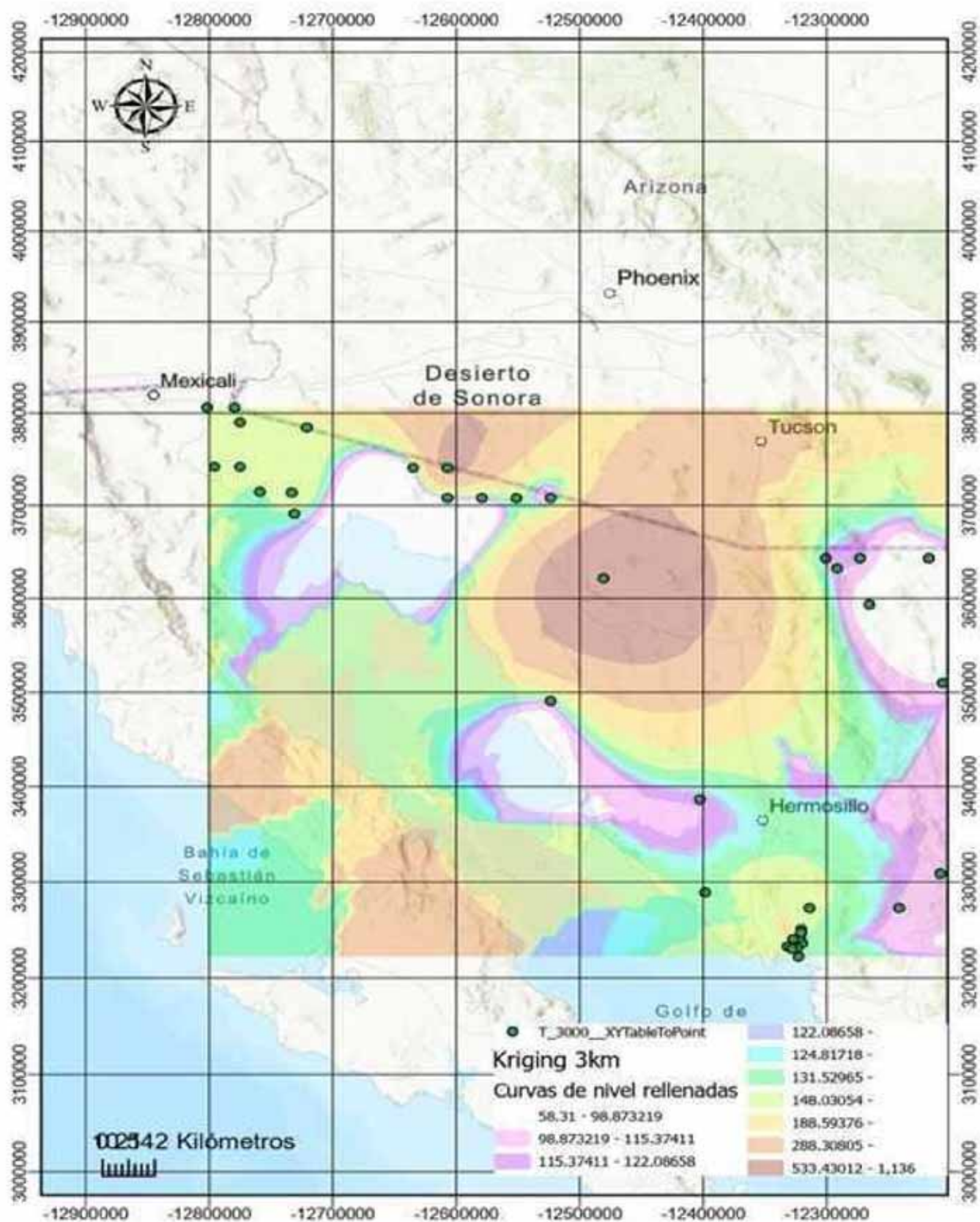


figura 25. mapa kriging del estado de Sonora a 3km de profundidad

En el caso de las temperaturas registradas a los 3km de profundidad se nota un aumento considerable en las zonas SON-6, SON,7 Y SON-5, dentro de la interpolación el rango más alto obtenido fue de 188.59°.

En compracion con los datos obtenidos de las temperaturas de lpos 10km de profundidad

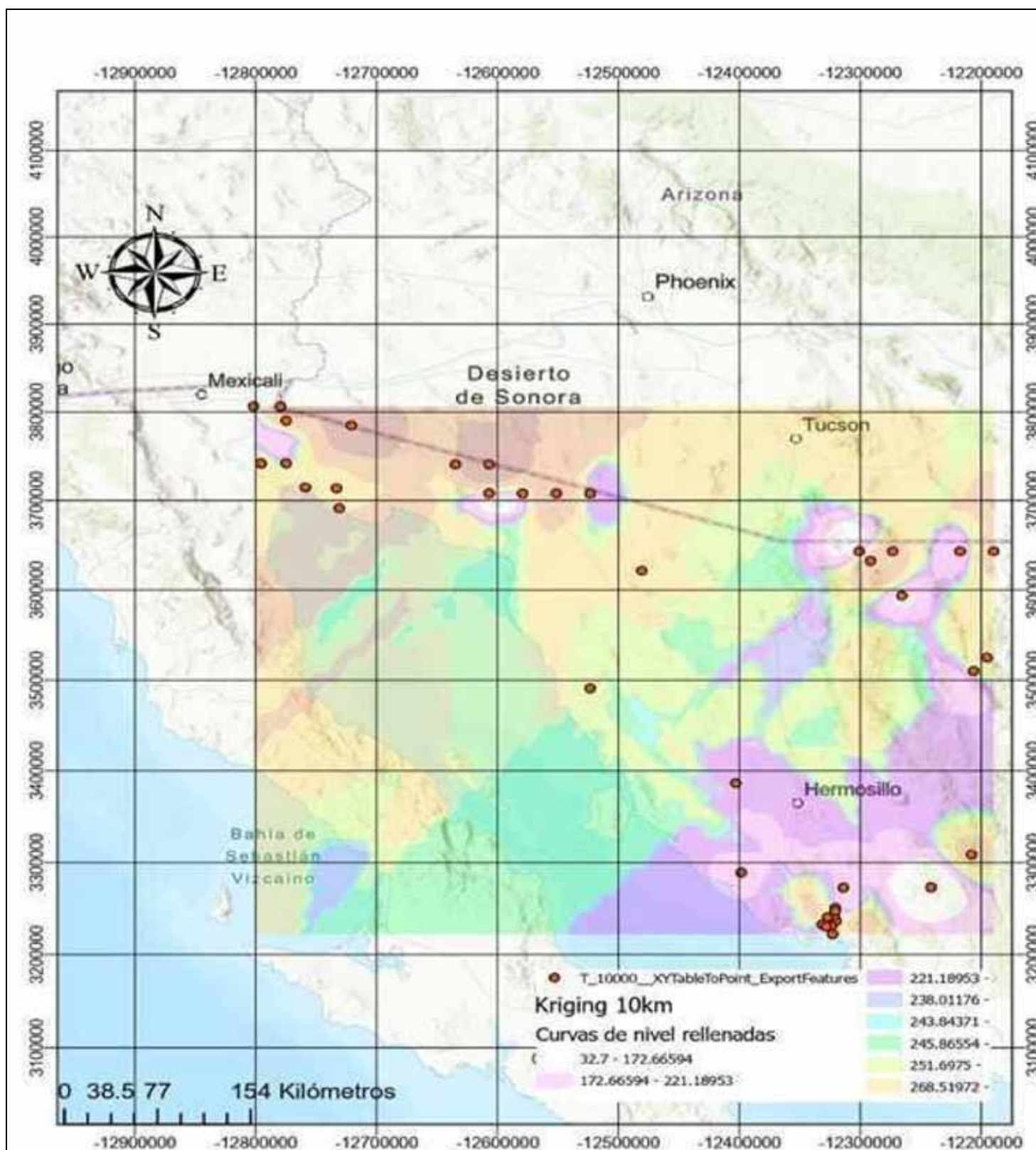


figura 26. mapa kriging a 10km de profundidad correspondiente al estado de Sonora.

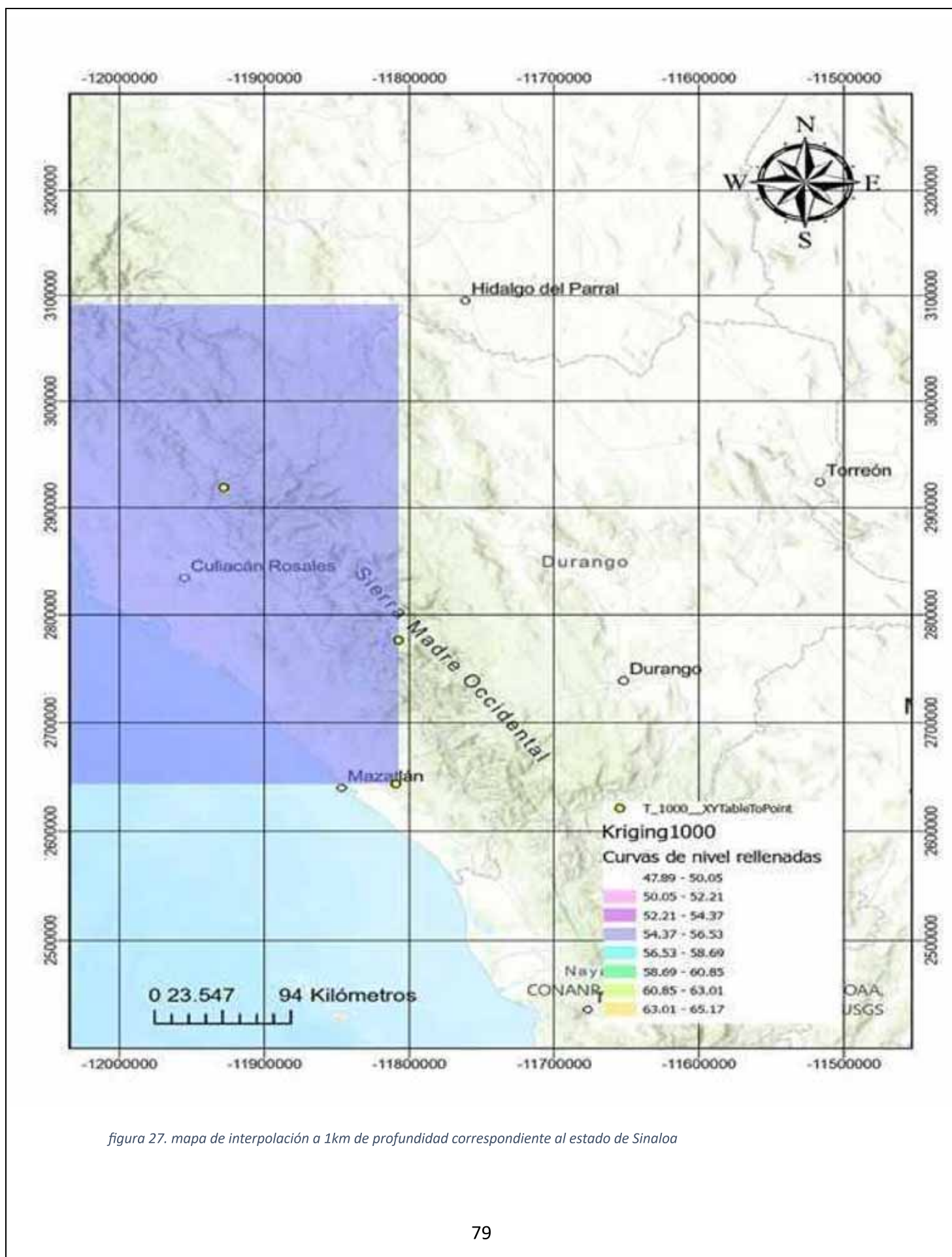


figura 27. mapa de interpolación a 1km de profundidad correspondiente al estado de Sinaloa

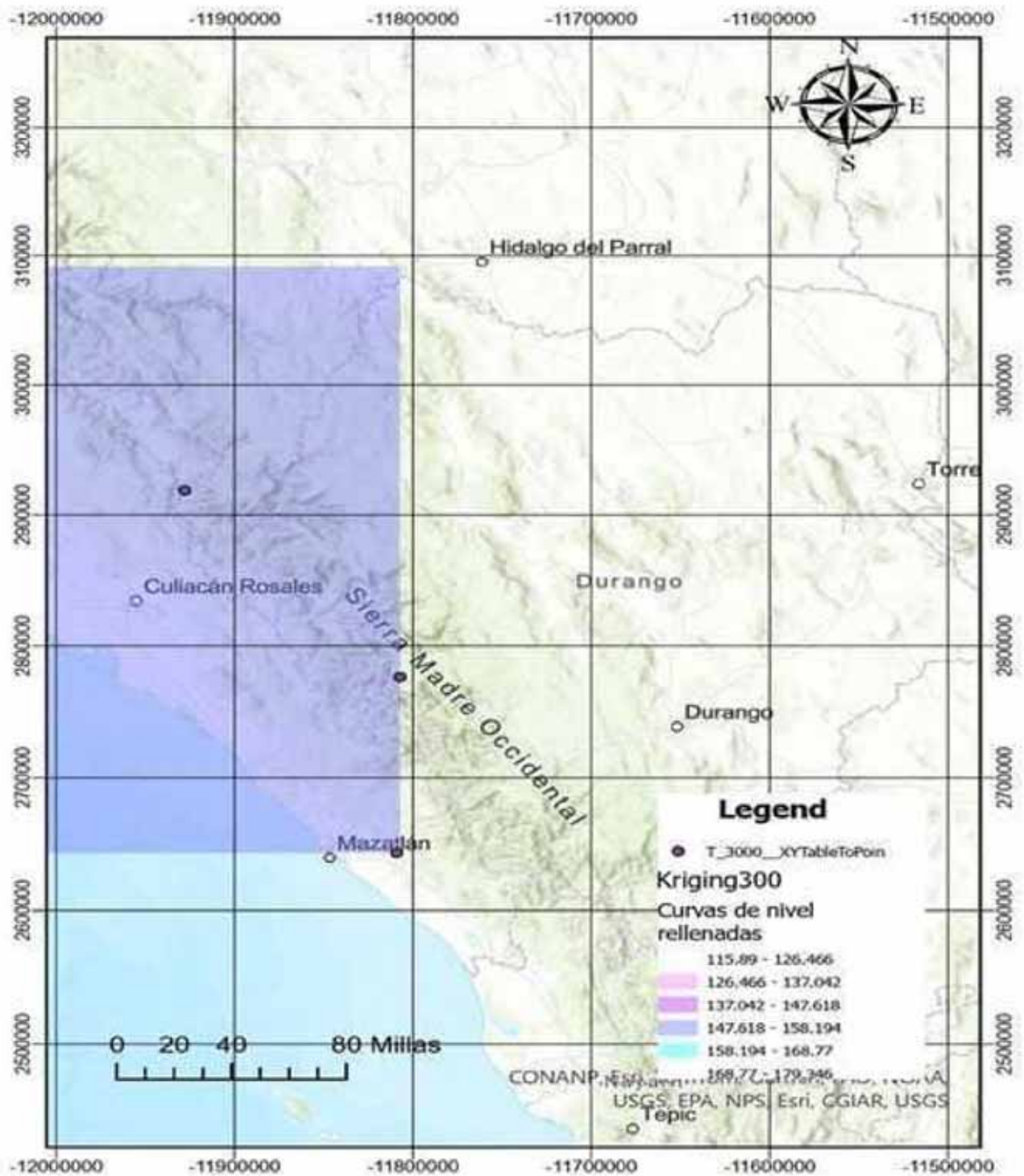


figura 28. mapa kriging a 3km de profundidad correspondiente al estado de Sinaloa

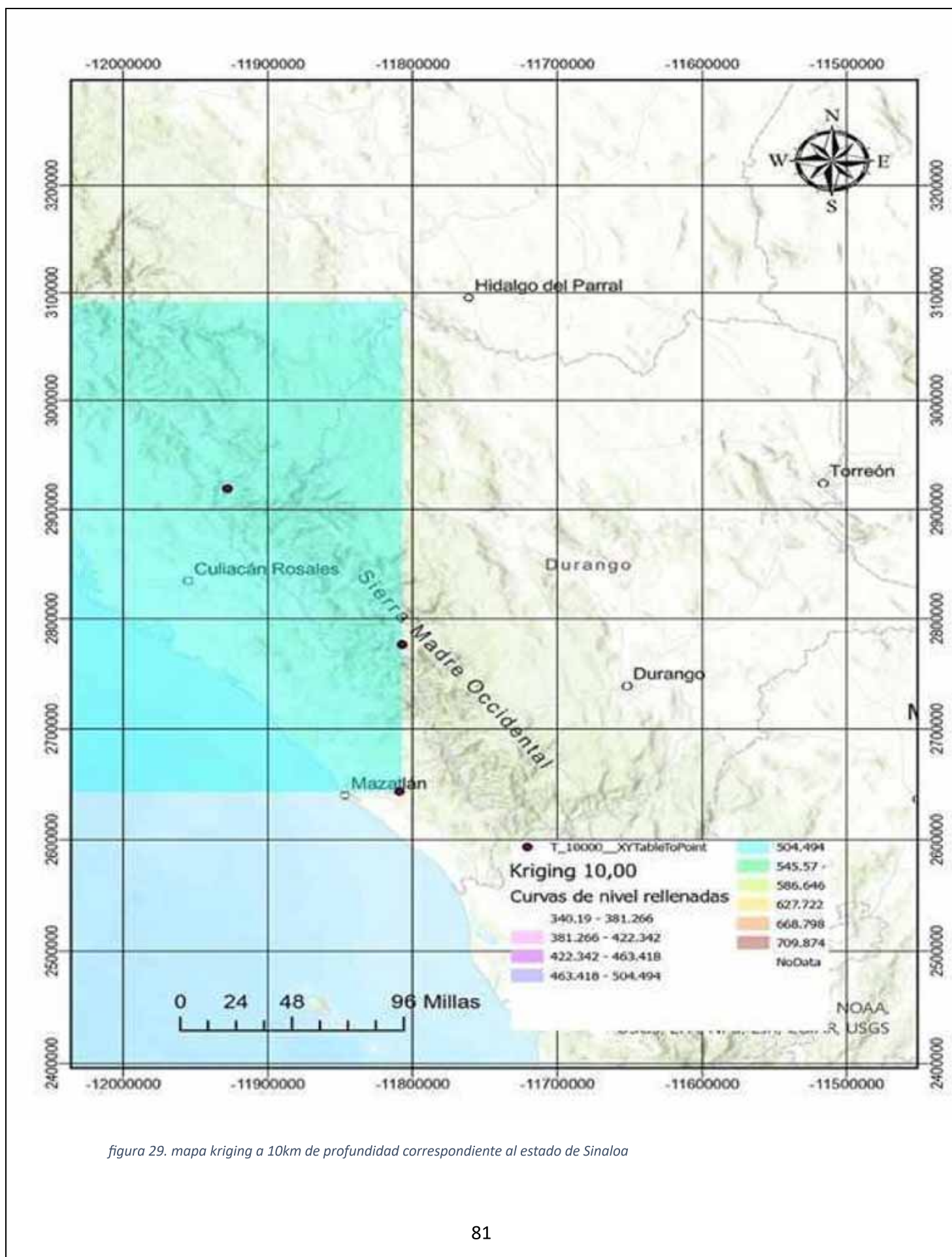


figura 29. mapa kriging a 10km de profundidad correspondiente al estado de Sinaloa

En el caso de las figuras, 27, 28 y 29, correspondientes a los mapas kriging del estado de Sinaloa, al ser una zona con muy pocos datos para realizar una interpolación, se obtuvo un conjunto de mapas con una gran similitud el cual mostraba que solo se registraba una sola tonalidad, dentro de la rampa de color correspondiente a las temperaturas

Esto se debió a la falta de datos dentro de la zona al solo contar con 4 puntos, los cuales comparten datos iguales, de sus geología, y profundidad, al tener características tan similares sus temperaturas registradas fueron de igual manera muy similares.

Debido a lo anterior al momento de querer realizar la gráfica de validación del kriging nos arrojaba que no era algo viable principalmente por lo ya anteriormente comentado que solo eran 4 datos.

Una vez desarrollados los mapas de interpolación de temperatura, se procedió a validar los resultados obtenidos con el modelo de interpolación Kriging, esto fue a través de correlacionar los datos calculados con los predichos por el modelo Kriging.

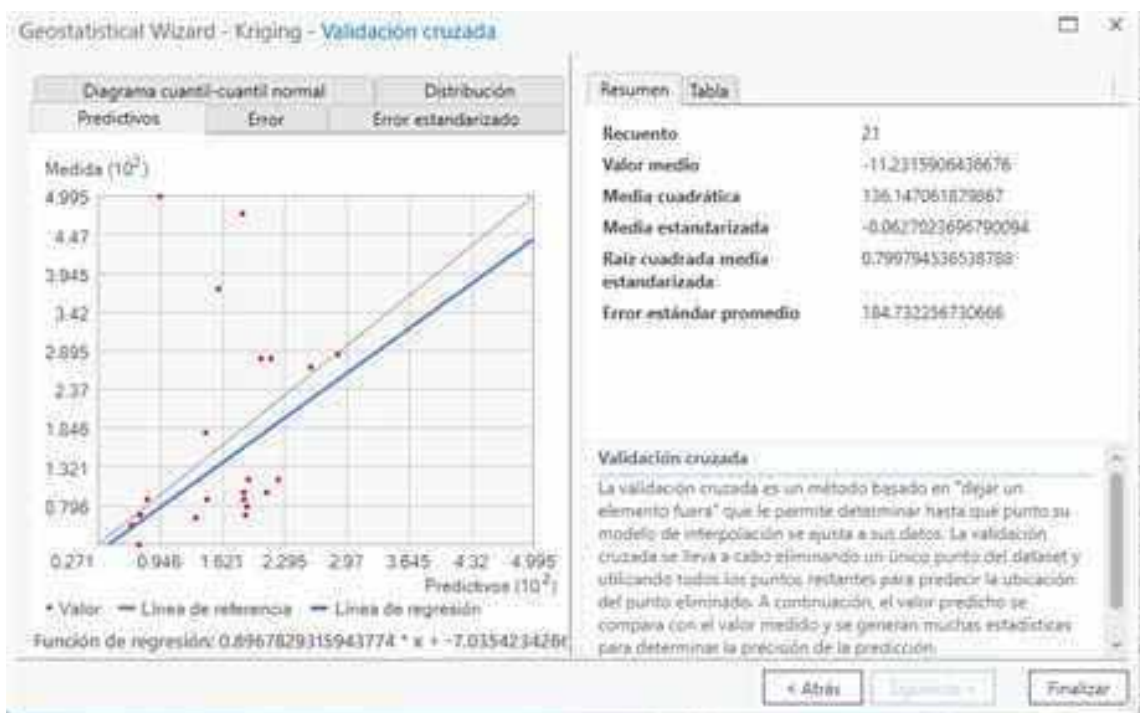


figura 30. grafica de validación de los valores estimados por el método de interpolación kriging, aplicado al estado de Baja California

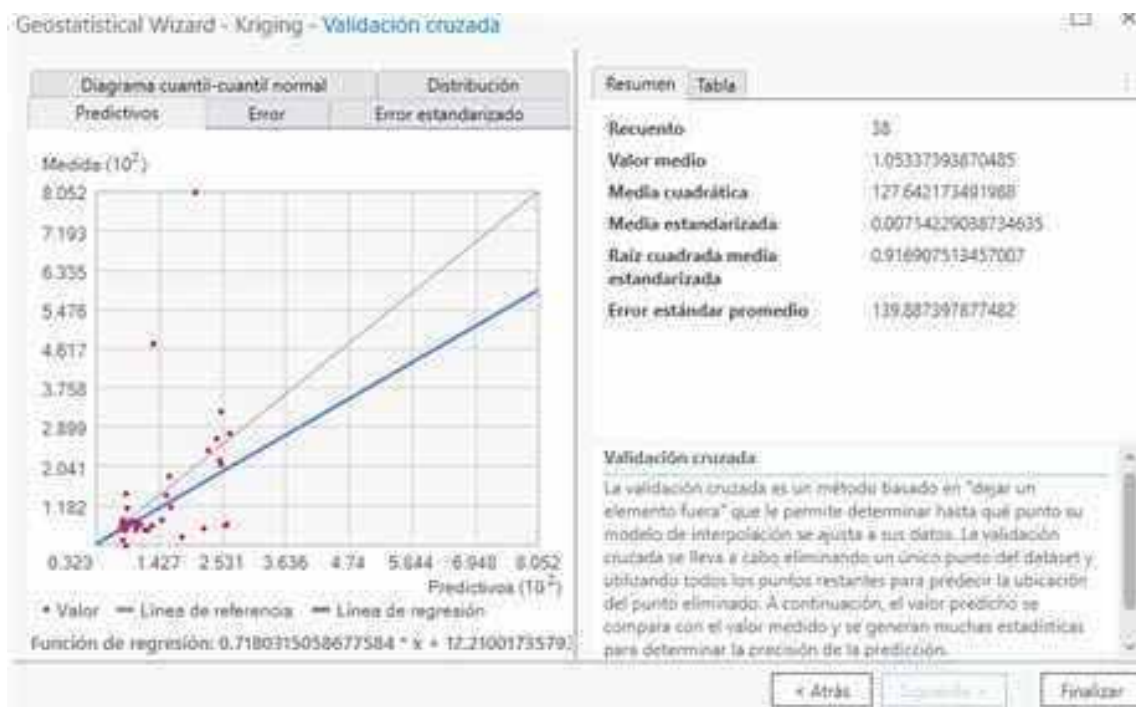


figura 31. gráfico de validación del estado de Baja California Sur.



figura 32. gráfico correspondiente a la validación de Kriging del estado de Sonora

En las figuras 30,31 y 32 , se representan las validaciones cruzadas de las interpolaciones de temperaturas para los distintos estados, usando el modelo Kriging. Estas validaciones corresponden a las correlaciones entre los datos calculados y los predichos por el modelo Kriging. En el caso del estado de Baja California (Figura 30), a pesar de que la validación cruzada no fue completamente dentro de la línea recta, el modelo Kriging simple fue el que brindo una mejor interpolación del resto de modelos Kriging. Para el caso de Baja California Sur (Figura 31), la mayor parte de los puntos se centraron, lo cual podría decirnos que, si es viable el modelo de predicción.

Después, en el caso de Sonora (Figura 32) se optó por un modelo de error estándar dentro de un Kriging simple, esto al ser el modelo que mejor se ajustó para poder predecir el comportamiento de las temperaturas registradas; se observó que la línea no es completamente perpendicular, esto debido a la distribución de los datos. Por último, para el estado de Sinaloa, debido al bajo número de datos y su similitud de valores de temperatura, no fue posible hacer un análisis de validación.

Interpretaciones y Discusiones

Una vez obtenidos los datos de los perfiles de temperatura mediante la ecuación (10) para los primeros tres kilómetros, se procedió a aplicar las ecuaciones 11 y 12 para calcular las temperaturas en los perfiles desde los cuatro hasta los diez kilómetros de profundidad. Los resultados obtenidos fueron resumidos en la Tabla 5.

Además, se realizaron ejemplos visuales utilizando gráficos de puntos, los cuales mostraron la relación entre la temperatura y la profundidad, en el rango de los 100 m hasta la capa basal. La profundidad de la capa basal variaba según las características litológicas y geológicas de cada zona.

Posteriormente, utilizando las ecuaciones 13 a 14, se calculó el potencial teórico energético de cada zona, asignándoles una nomenclatura que incluía el nombre del estado y un número. Con esto, se establecieron subzonas dentro de las cuales se calcularon las temperaturas correspondientes a los puntos registrados.

Una vez establecidos los datos de temperatura entre los cuatro y diez kilómetros de profundidad, se organizaron en la Tabla 5, que se dividió por estado y zona de estudio. Con estos datos, se elaboraron mapas de interpolación mediante el método Kriging, utilizando tres unidades de profundidad para representar el comportamiento de las temperaturas en las zonas estudiadas. Las profundidades consideradas representativas fueron, el kilómetro 1, el kilómetro 3 y el kilómetro 10, ya que estas profundidades están directamente relacionadas con el modelo analítico utilizado, que comienza con el cálculo a 100 m, luego con el límite sedimento-basamento a tres kilómetros, y finalmente hasta los 10 km.

Se optó por el modelo de interpolación Kriging para determinar el comportamiento de los datos. En el mapa de Baja California, por ejemplo, no se observó una diferencia tan pronunciada en las temperaturas a los primeros 100 m, mientras que en Baja California Sur y Sonora se registró una mayor diversificación en las temperaturas. Este comportamiento fue especialmente evidente en las figuras 21 y 24. En cambio, en Sinaloa, no se apreció un cambio significativo en las tonalidades, lo que podría deberse a la baja concentración de datos en esa zona. Es importante señalar que esta zona presentó la misma anomalía en todos los mapas de predicción realizados. La falta de una gran cantidad de datos, junto con

las similitudes geológicas, litológicas y geofísicas de la zona, podría explicar la homogeneidad en el comportamiento de las temperaturas entre los puntos.

En cuanto a Baja California Sur y Sonora, se observó un comportamiento similar respecto a la variabilidad de las temperaturas, debido a la mayor concentración de datos en ambas zonas, las cuales fueron las que contaron con un mayor número de registros

Capítulo 7

Conclusiones

El objetivo principal de esta investigación fue evaluar el potencial geotérmico del noroeste de México, Así, el proyecto se centró en estimar la energía disponible en las zonas geotérmicas de los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora y Sinaloa.

Mediante la aplicación del método analítico descrito en la metodología, se lograron establecer varios factores que permitieron obtener datos cruciales para entender el comportamiento de las zonas estudiadas. Algunas áreas mostraron un alto potencial para la generación de energía eléctrica, mientras que otras no presentaron el mismo nivel de viabilidad, debido a diversos factores específicos de cada región. Sin embargo, estas zonas aún pueden aprovecharse para otros procesos, más allá de la generación eléctrica, como los Usos Directos

Baja California Sur y Sonora se destacaron como los estados con mayor potencial, aunque los cuatro estados comparten características geológicas similares, los resultados variaron significativamente. Estas diferencias podrían estar relacionadas con factores como los gradientes geotérmicos y la elevación, entre otros.

De manera gráfica, la presentación de los mapas de interpolación fue una herramienta clave para comprender el potencial presente en las zonas de estudio. Dado que no fue posible observar directamente el comportamiento subterráneo, se optó por esta metodología, la cual resultó ser efectiva para cumplir con los objetivos planteados en el proyecto. Finalmente, se logró estimar el potencial teórico de cada uno de los estados del noroeste de México, alcanzando así los fines del estudio.

Referencias Bibliográficas

Aguilar Dumas, Álvaro. (2008). Análisis geológico-productivo enfocado a la exploración de la parte oriental del campo geotérmico de Cerro Prieto, Baja California. C.F.E. Residencia general Cerro Prieto, Geotermia vol.21 No1 enero-junio-2008.

Aghahosseini, A., and C. Breyer (2020). From hot rock to useful energy: A global estimate of enhanced geothermal systems potential. *Applied Energy*, 279, 115769. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115769.

Aragón-Aguilar, A., G. Izquierdo-Montalvo, and S. López-Blanco (2014). Methodology for stored heat evaluation that could be applied in geothermal systems: A case of a Mexican field. *Geothermal Resource Council Transactions*, 38, 941-946.

Aragón-Aguilar, A., G. Izquierdo-Montalvo, S. López-Blanco, and R. Gómez-Mendoza (2015). Stored heat evaluation in geothermal systems: A case of a Mexican field. *Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, 5(5), 1-9.

Augustine, C., J.W. Tester., B. Anderson (2006). A Comparison of geothermal with oil and gas well drilling cost. Chemical Engineering Department Massachusetts Institute of Technology.

Beardsmore, G. R., L. Rybach, D. Blackwell, and C. Baron (2011). A protocol for Estimating and Mapping Global EGS Potential. May 2011 edition.

Beardsmore, Graeme R., and Cooper, Gareth T. (2009). Geothermal Systems Assessment – Identification and Mitigation of EGS Exploration Risk. Proceedings, thirty-fourth workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford University, Stanford, California, February 9-11, 2009, SGP-TR.

Beardsmore, Graeme R., Rybach, Ladislaus R., Blackwell, David, and Baron, Charles. (2011). A Protocol for Estimating and Mapping Global EGS Potential. May 2011 edition.

Braun, J., (2003). Pecube: A new finite element code to solve the 3D heat transport equation including the effects of a time-varying, finite amplitude surface topography, Computers and Geosciences, v. 29, p. 787-794.

Cooper, G. T., and G. R. Beardsmore (2010). Engineered geothermal systems in the Australian context - Resource definition in conductive thermal settings. In: Proceedings of the World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, April 25-29, 1-8.

Cooper, T. Gareth, Beardsmore, Graeme R. (2010). Engineered Geothermal Systems in the Australian Context- Resource Definition in Conductive Thermal Settings. Proceedings World Geothermal Congress 2010., Bali, Indonesia 25-29 April 2010.

Cooper, T. Gareth, Beardsmore, Graeme R., Waining, Benjamin S., Pollington, Nicky, Driscoll, Jim P. (2010). The Relative Cost of Engineered Geothermal System Exploration and Development in Australia. Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.

Cruz-Castillo, M. (2002). Catálogo de las fallas regionales activas en el norte de la Baja California, México. Geos 22(1), 38-42.

Fernández de la Vega Márquez, L. T. (2019). Geographical information systems and analytic hierarchy process for the evaluation of oil and gas wells for geothermal use. University of Aberdeen. 77 pp.

Franco, A., and Donatini, F. (2017). Methods for the estimation of the energy stored in geothermal reservoirs. *Journal of Physics: Conference Series*, 796(012025), 1-11. doi:10.1088/1742-6596/796/1/012025.

Franz, P., Neville-Lamb, M., Azwar, L., and Quinao, J. (2015). Calculation of geothermal stored heat from a numerical model for reserve estimation. In: *Proceedings of the World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 April*, 1-5.

Gibson, H. J., Stüwe, K., Seikel, R., and FitzGerald, D. (2009). Practical aspects of 3D temperature and heat flow modeling for exploration of EGGs energy plays. *Australian Geothermal Energy Conferences 2009*.

Gibson, Helen J., Stüwe, K., Seikel, Ray, and FitzGerald, D. (2009). Practical aspects of 3D temperature and heat flow modeling for exploration of EGGs energy plays. *Australian Geothermal Energy Conferences 2009*. <http://dx.doi.org/10.4172/2090-4541.1000179>.

Gray, D. A., Majorowicz, J., and Unsworth, M. (2012). Investigation of the geothermal state of sedimentary basins using oil industry thermal data: case study from Northern Alberta exhibiting the need to remove biased data systematically. *Journal of Geophysics and Engineering*, 9(5), 534-548. doi: 10.1088/1742-2132/9/5/534.

Gutiérrez Negrín, L.C.A., Canchiola Félix I., Romo Jones J.M., & Quijano León J.L (2020). Geothermal energy in Mexico: update and perspectives: *Proceedings World Geothermal Congress 2020 on Reykjavik, Iceland April 26- May 2, 2020*, 1-13.

Iglesias, E. R., Torres, R. J., Martínez-Estrella, J. I., Lira-Argüello, R., Paredes-Soberanes, A., Reyes-Picasso, N., Pról, R. M., Espinoza-Ojeda, O. M., López-Blanco, S., and González-Reyes, I. (2016). Potencial teórico SGM en los afloramientos del basamento en México. *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, 29(2), 6-17.

Iglesias, E. R., R. J. Torres, J. I. Martínez-Estrella, R. Lira-Argüello, A. Paredes-Soberanes, N. Reyes-Picasso, R. M. Pról., O. M. Espinoza-Ojeda, S. López-Blanco, and I. González-Reyes (2016). Potencial teórico SGM en los afloramientos del basamento en México. *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, 29(2), 6-17.

Jacek, Majorowicz, and Stephen E. Grasby. (2010). High Potential Regions for Enhanced Geothermal Systems in Canada. *Natural Resources Research*, Vol. 19, No. 3, September (2010).

Kong, Y., S. Pan, Y. Ren, W. Zhang, K. Wang, G. Jiang, Y. Cheng, W. Sun, C. Zhang, S. Hu, and L. He (2021). Catalog of enhanced geothermal systems based on heat sources. *Acta Geologica Sinaloa*, 95(6), 1882-1891. doi: 10.1111/1755-6724.14876.

Laske, G., Masters, G., Ma, Z., and Pasyanos, M. (2013). Update on CRUST1.0 - A 1-degree Global Model of Earth's Crust. *Geophysical Research Abstracts*, 15. Abstract EGU2013-2658.

Macías Vázquez, José Luis, Jiménez Salgado, Esteban. (2013). Estudio de estratigrafía y geología del complejo volcánico Tres Vírgenes, Baja California Sur. Instituto de Geofísica, UNAM. Gerencia de Proyectos Geotermoelectricos. CFE. Departamento de Exploración Geológica.

Majorowicz, Jacek, and Stephen E. Grasby., High Potential Regions for Enhanced geothermal Systems in Canada. (2010) *Natural Resources Research*, vol19, No 3 September 2010., doi:10.1007/s1053-010-9119-8.

Mammerickx, J., Klitgord, K.D., 1982. Northern East Pacific Rise: Evolution from 25 m y. B.P. to the present. of the Australian Geothermal Energy Conference, Adelaide, Australia, 56-61.

Ordaz Méndez, C. A., Flores Armenta, M., and Ramírez Silva, G. (2011). Geothermal potential in México. *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, 24(1), 50-58.

Ortega Gutiérrez, Fernando., Prieto Vélez, Ramón., Zúñiga, Yira., Flores, Sergio. (1979). Una secuencia vulcano-plutónica, sedimentaria, cretácica en el norte de Sinaloa, un complejo Otolítico. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto De Geología. Revista vol. 3 numero 1(1979) p.1-8.

Piri's, G., I. Herms, A. Grier, M. Colomer, G. Arnó, and Gómez-Rivas, E. (2021). 3DHIP-Calculator—A new tool to stochastically

evaluate geothermal potential of geothermal reservoirs. *Geothermal Energy* 9(3), 1-22. <https://doi.org/10.1186/s40517-021-00056-2>.

Pratt, T., Hall, R., and Leech, J. (2009). Effect of thermal anisotropy on temperature and stress in geothermal reservoirs. In: *Proceedings of the 34th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, California, 1-3.

Pratt, T., Hall, R., and Leech, J. (2010). Effect of thermal anisotropy on temperature and stress in geothermal reservoirs. *Geothermics*, 39(2), 94-108. doi:10.1016/j.geothermics.2010.02.002.

Reza, M., and P. R. Voss (2011). Thermal response of geothermal systems in the Permian Basin, Texas: Effects of heat flow, temperature gradients, and geothermal potential. *Journal of Petroleum Technology*. 63(2), 100-105. DOI:10.2118/133779-JPT.

Rodríguez Ramos, J. (2016). Perforación geotérmica en Cerro Prieto, Baja California. *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, 29(1), 17-25.

Rybach, L. (2003). Geothermal Energy, Society and Economy: An Overview. *Geothermics*, 32(4), 381-397.

Simson, L., and Jones, E. (2003). The Geothermal Potential of Mexico, *Geotermia*, Vol. XXXIV No. 3(1993).

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Geociencias y planificación del territorio	
Título del trabajo	" Aplicación del Método Analítico para la Estimación del Potencial Teórico Energético en el Noroeste de México: Baja California, Baja California Sur, Sonora y Sinaloa".	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Diego Armando Martínez Ruiz	1130167j@umich.mx
Director	Orlando Miguel Espinoza Ojeda	orlando.espinoza@umich.mx
Codirector		
Coordinador del programa	Boris Chaco Tchamabe	Mae.geociencias.planificacion.territorio@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	no	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	no	
Traducción a otra lengua	no	
Revisión y corrección de estilo	no	
Análisis de datos	no	
Búsqueda y organización de información	no	
Formateo de las referencias bibliográficas	no	
Generación de contenido multimedia	no	
Otro	no	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Diego Armando Martínez Ruiz
Lugar y fecha	Morelia Michoacán, 21 de mayo de 2025

Diego Armando Martínez Ruiz

Aplicación del Método Analítico para la Estimación del Potencial Teórico Geotérmico del Noroeste de



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:468095263

Fecha de entrega

18 jun 2025, 1:47 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

18 jun 2025, 1:50 p.m. GMT-6

Nombre de archivo

Aplicación del Método Analítico para la Estimación del Potencial Teórico Geotérmico del Noroest....pdf

Tamaño de archivo

75.2 MB

93 Páginas

16.842 Palabras

86.910 Caracteres

15% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Fuentes principales

- 15%  Fuentes de Internet
- 7%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.