



**UNIVERSIDAD DE SONORA  
DPTO. GEOLOGIA**

**MATERIA: CARTOGRAFIA**

**MAESTRO: MC JOSÉ ALFREDO OCHOA G.**

**TEMA: CARTOGRAFIA HIDROGEOLOGICA**



# UNIVERSIDAD DE SONORA

## División de Ciencias Exactas y Naturales

### Departamento de Geología



**“MODELACIÓN DEL COMPORTAMIENTO  
HIDRODINÁMICO DEL AGUA  
SUBTERRÁNEA DE LA ZONA  
COMPREDIDA ENTRE CARBÓ,  
PESQUEIRA Y ZAMORA, SONORA”.**



# OBJETIVOS



- Determinar la geometría del área de estudio.
- Determinar un balance de aguas subterráneas.
- Determinar las condiciones actuales del acuífero.
- Crear un modelo matemático de flujo hidráulico subterráneo con Mod-Flow y analizar el comportamiento del agua subterránea en el área de estudio.
- Calibrar la información de las condiciones actuales y predecir el comportamiento del acuífero, conforme al resultado del mismo.
- Predecir los niveles del agua subterránea para diferentes tiempos.



# ETAPAS A DESARROLLAR



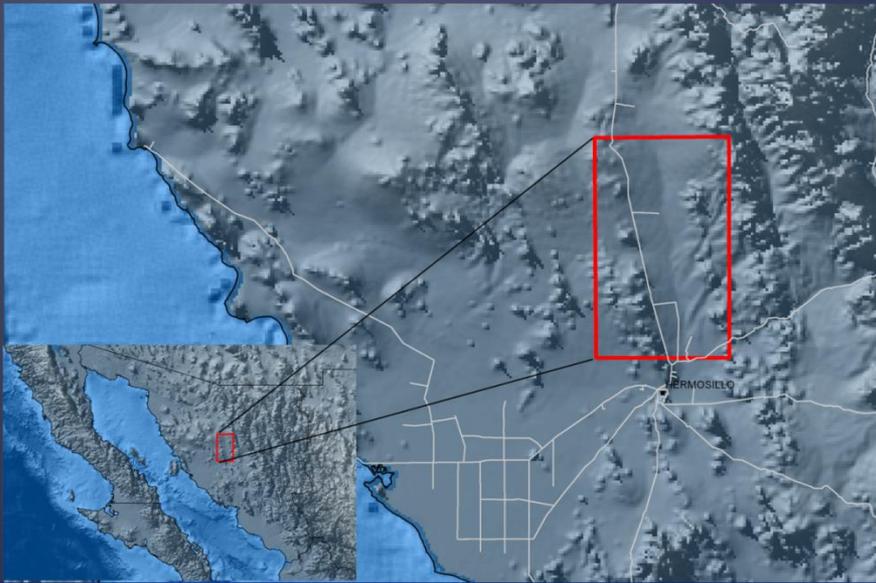
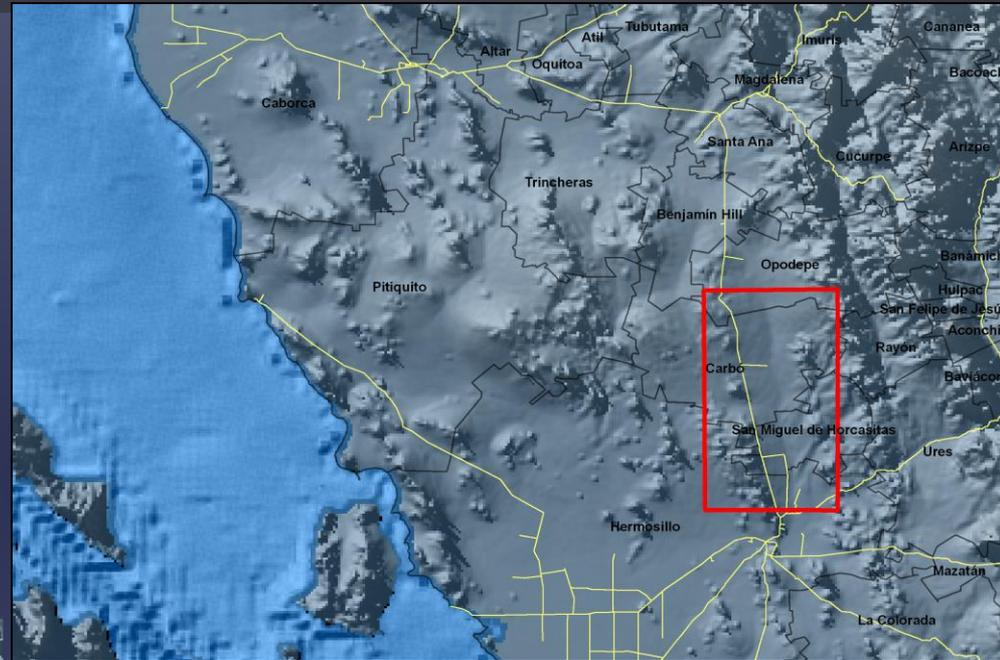
- Compilación, integración, resumen y análisis crítico de estudios previos.
- Descripción del entorno fisiográfico y análisis geológico, climatológico e hidrológico.
- Interpretación de la geología del subsuelo con información geofísica y geológica existente y realización de estudios geofísicos complementarios.
- Compilación e integración del censo de aprovechamiento y piezometría.
- Definición de los parámetros hidráulicos a partir de pruebas de bombeo e información existente.
- Determinación de la geometría del acuífero.
- Determinación del Balance de aguas subterráneas para el área de estudio.
- Realización de un modelo hidrológico matemático.
- Conclusiones y Recomendaciones.



# UBICACIÓN



El área de estudio se localiza al norte de la ciudad de Hermosillo abarcando principalmente los municipios de Carbón, San Miguel de Horcasitas y Hermosillo, cuenta con una superficie de 3,664 Km<sup>2</sup>.



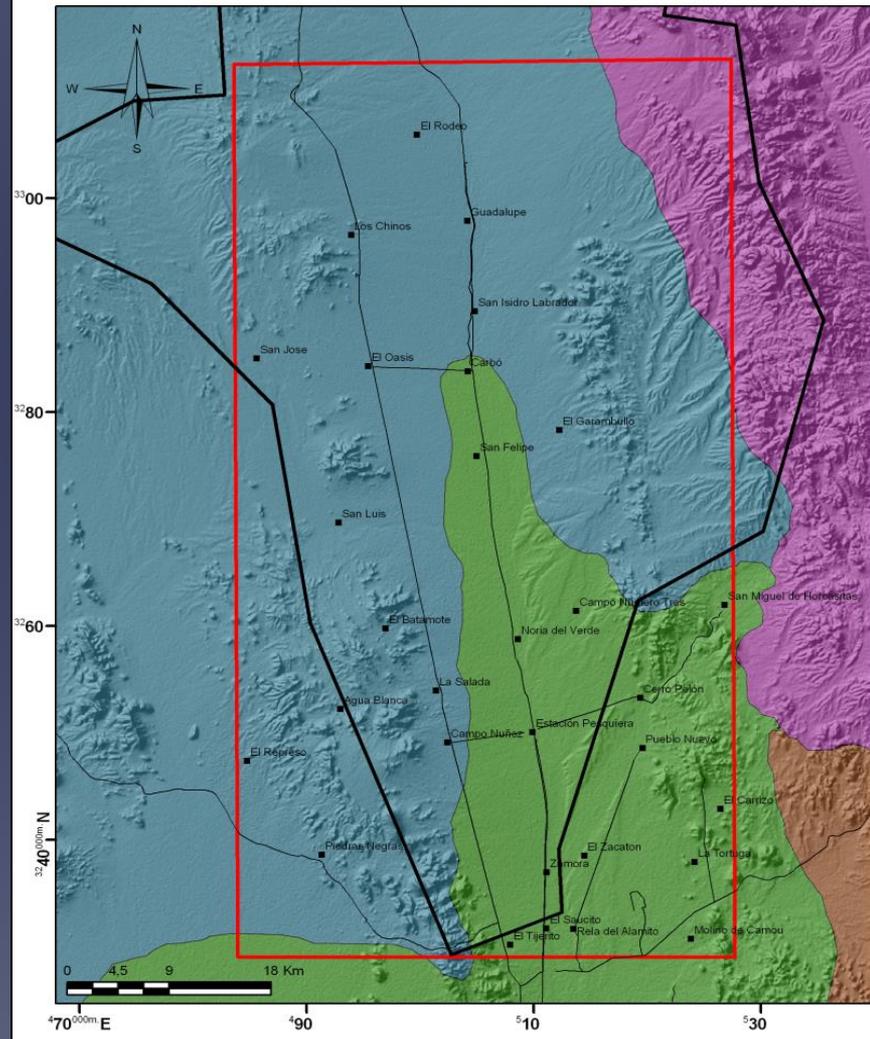
La zona de estudio se encuentra comunicada, las principales vía de comunicación es la carretera internacional No. 15 México - Nogales.



# CLIMATOLOGÍA



## Tipo de Climas



### Explicación

- BSo(h')** (h'w'o') Seco, con invierno calido
- BSchw(x')** Seco, semicalido con invierno fresco
- BWhw(x')** Muy seco, semicalido con invierno fresco
- BW(h')** (h'w'o') Muy seco con invierno calido

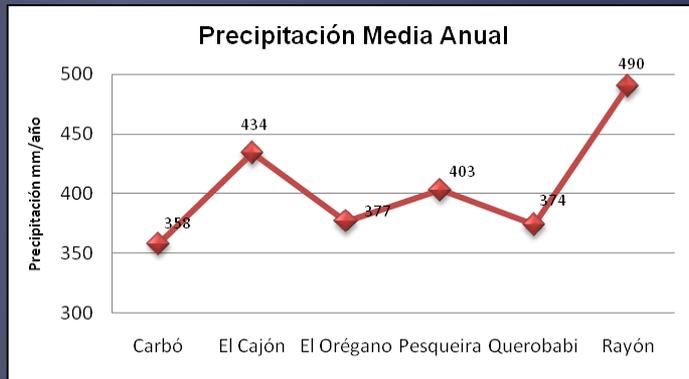


# CLIMATOLOGÍA

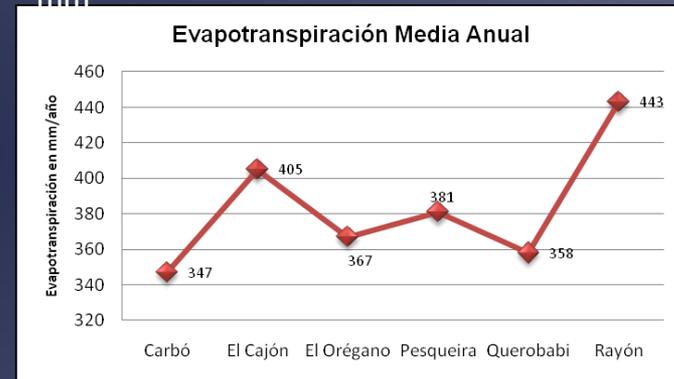


X	Y	Precipitación	Temperatura	Evapotraspiración
503493	3285058	358	22	347
530407	3260169	434	22	405
528562	3233296	377	25	367
510082	3249945	403	22	381
497938	3324207	374	21	358
541540	3286612	490	21	443

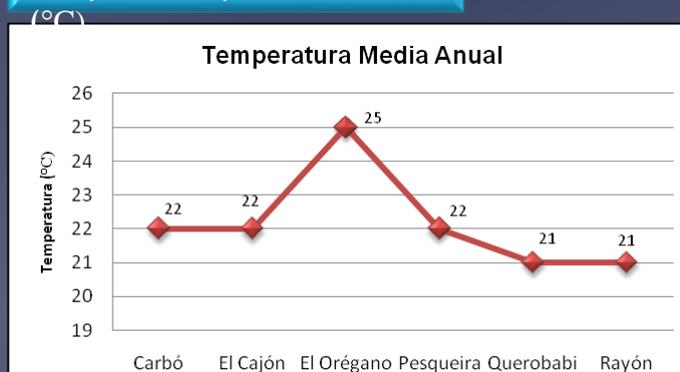
Precipitación promedio 408 mm



Evapotraspiración promedio 383 mm



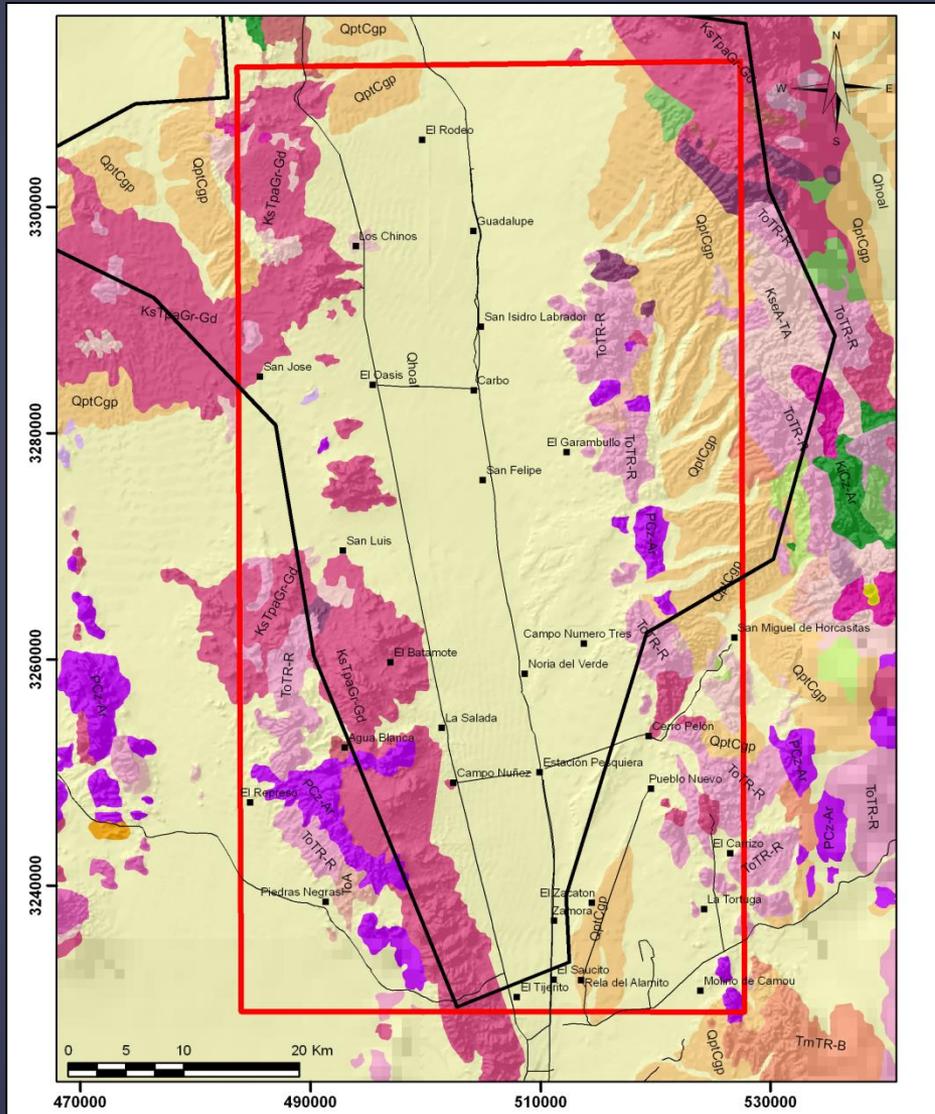
Temperatura promedio 22







# \* GEOLOGÍA



ERA	PERIODO	EPOCA	DESCRIPCIÓN	LITOLOGÍA
CENOZOICO	CUATERNARIO	RECIENTE	DEPÓSITOS ALUVIALES Y EÓLICOS (Qa)	[Yellow patterned block]
		PLEISTOCENO	CONLOMERADO (Qog)	[Yellow block with circles]
	TERCIARIO	PLIOCENO	FORMACIÓN BAUCARIT	[Brown block with triangles]
		MIOCENO	INGNIMBRITAS CON INTERESTRATIFICACIÓN BASALTOS Y ANDESITAS (Tib)	[Brown block with inverted triangles]
		OLIGOCENO		[Brown block with inverted triangles]
		EOCENO		[Brown block with inverted triangles]
PALEOCENO	[Brown block with inverted triangles]			
MESOZOICO	CRETÁCICO		INTRUSIVOS GRANÍTICOS GRANODEORÍTICO (Kgr)	[Red block with diagonal lines]
		JURÁSICO	NO AFLORA EN EL ÁREA DE ESTUDIO	[Green block with vertical lines]
	TRIÁSICO			
PALEOZOICO	PÉRMICO	CALIZAS CON CRINOIDES Y PALECÍPODOS (Poz)	[Purple block with brick pattern]	
	PENSILVÁNICO			
	MISISSIPICO			

Rocas que varían desde el Precámbrico al reciente predominando las rocas ígneas intrusivas, principalmente las rocas de tipo intrusivo del Cretácico de composición granito y granodiorita (ksTpaGr-Gd). Todas estas rocas forman parte del Batolito Laramídico de Sonora.

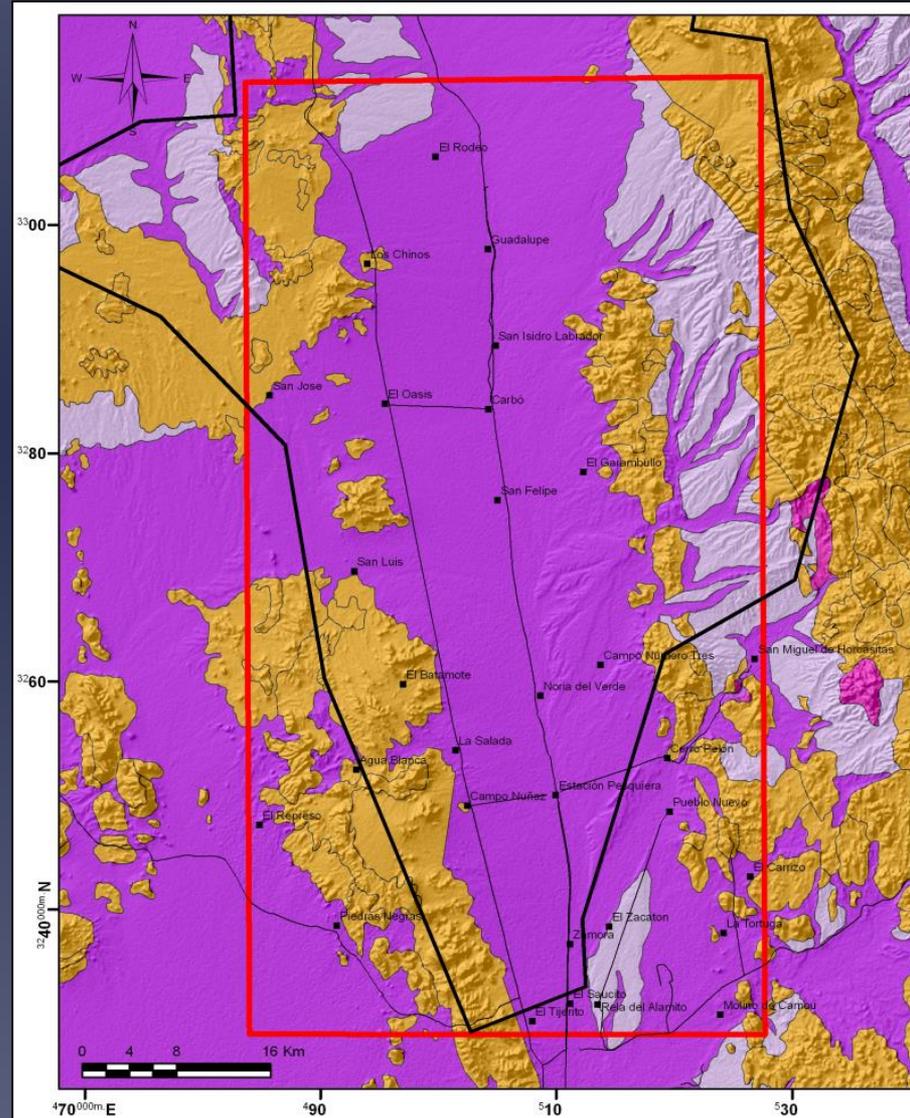


# \* UNIDADES GEOHIDROLÓGICAS



Estas unidades se han definido considerando las posibilidades de las rocas de contener agua, tomando en cuenta las características físicas, litológicas y estructurales.

-  Material consolidado, posibilidad baja
-  Material no consolidado, posibilidad alta
-  Material no consolidado, posibilidad media
-  Material no consolidado, posibilidad baja

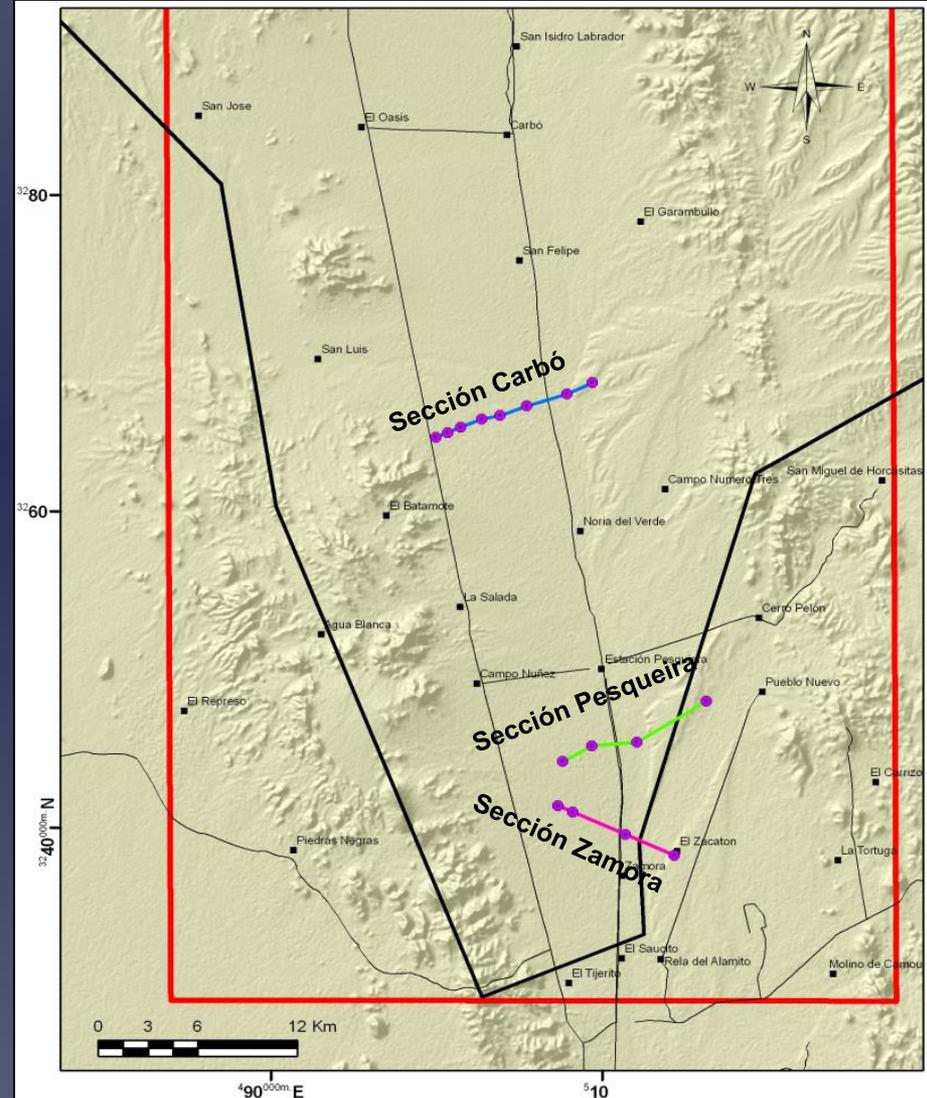




# \* SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES



Se reinterpretraron 16 sondeos eléctricos verticales (SEV's) llevados a cabo en el área de estudio por Guysa en el año 2000.





# \* SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES



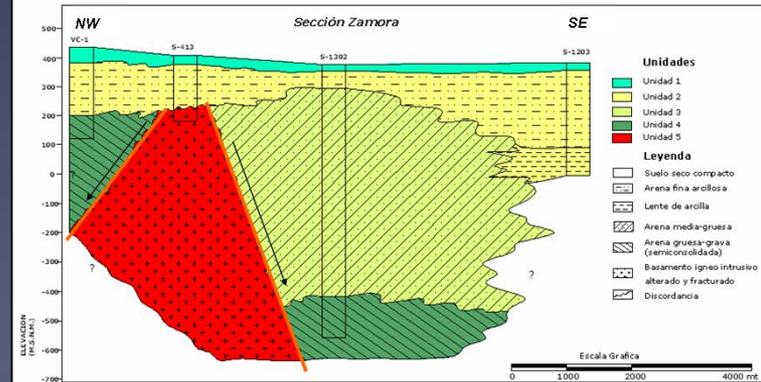
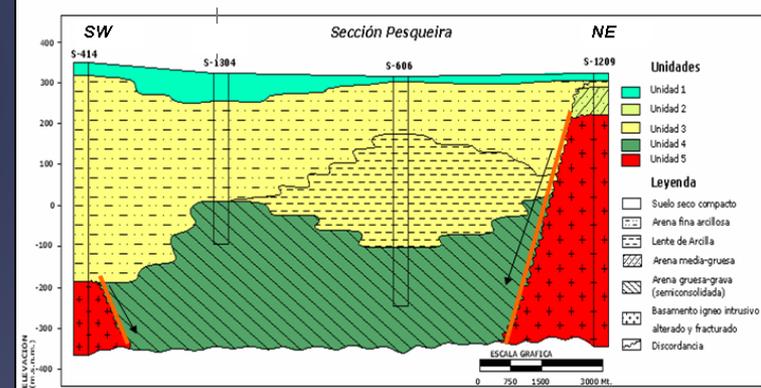
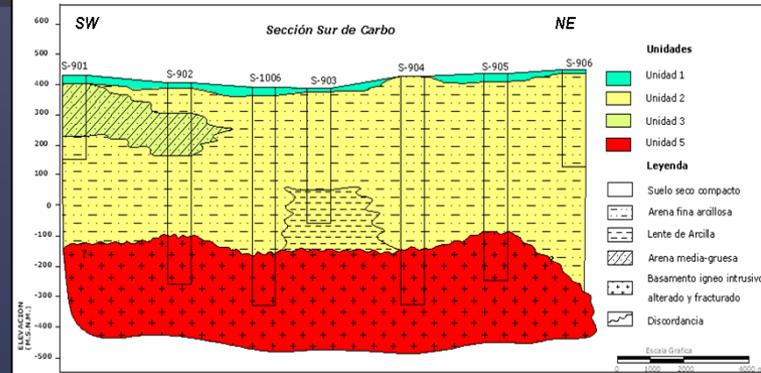
• **Unidad 1:** Representa la parte superficial del subsuelo la cual se encuentra seca y/o compacta, sus espesores varían de 5.5m a 63m.

• **Unidad 2:** Comprendida por paquetes de arena de media a gruesa con espesores que varían de 71 m a 360 m. Al sur de San Pedro se encuentra esta unidad intercalada con arena gruesa y grava con espesores de 33 m a 94m.

• **Unidad 3:** Dicha unidad se caracteriza por presentar variación en la granulometría que va de arcilla a arena arcillosa y a arena fina a media. Las arcillas se presentan con espesores variables pero puede llegar a tener hasta 170m de espesor. La arena fina-media tiene espesores de 157m a 464 m. Estos espesores de arena fina a media se observan más hacia la parte sur de Pesqueira en la zona de San Pedro.

• **Unidad 4:** Esta unidad se constituye por materiales de sedimentos semiconsolidados que se pueden relacionar con formaciones sedimentarias tipo Baucarit.

• **Unidad 5:** Esta unidad corresponde geológicamente con el basamento ígneo.



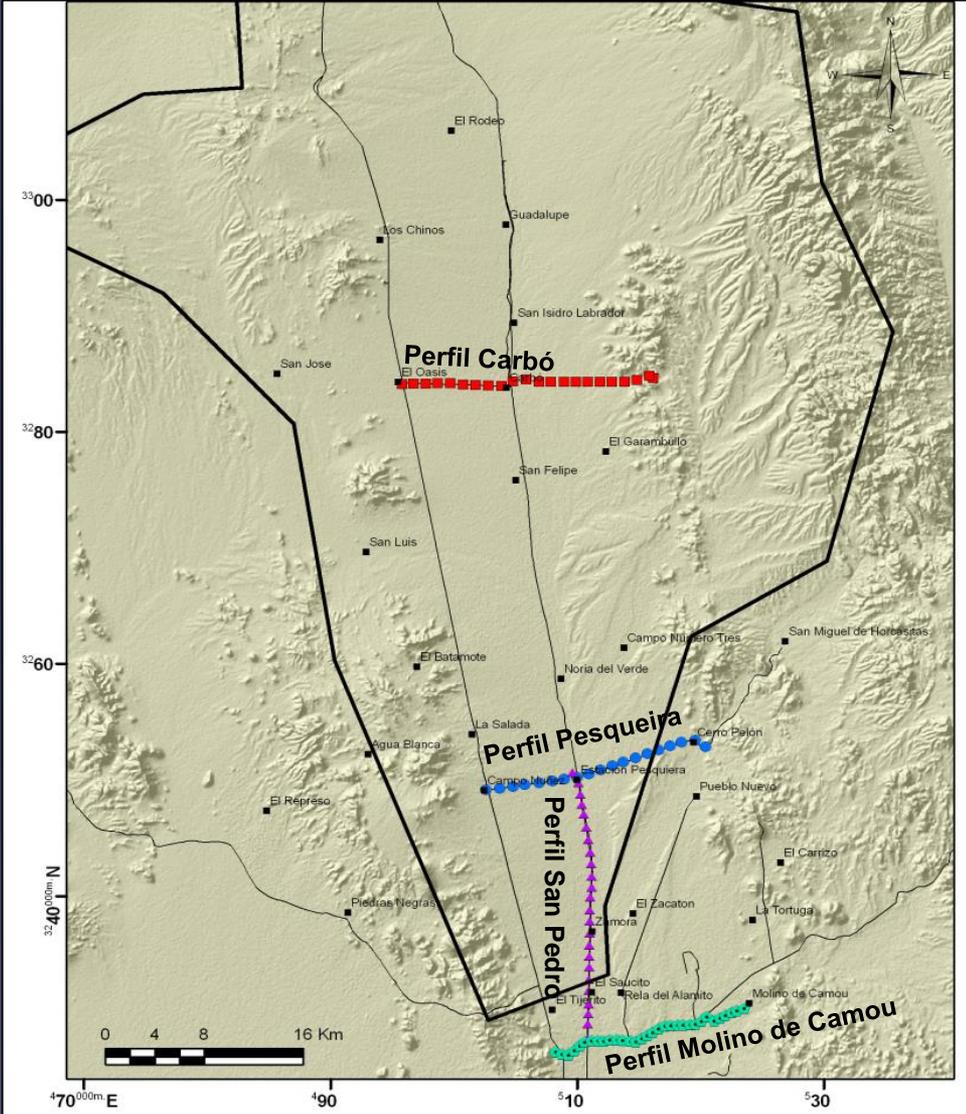


# \* GRAVIMET



Se reinterpretaron cuatro perfiles de gravimetría con un total de 121 sondeos gravimétricos.

Es primordial el análisis de la geología del subsuelo, para definir la geometría, estructuras y profundidad del basamento, que permita definir las condiciones de frontera.



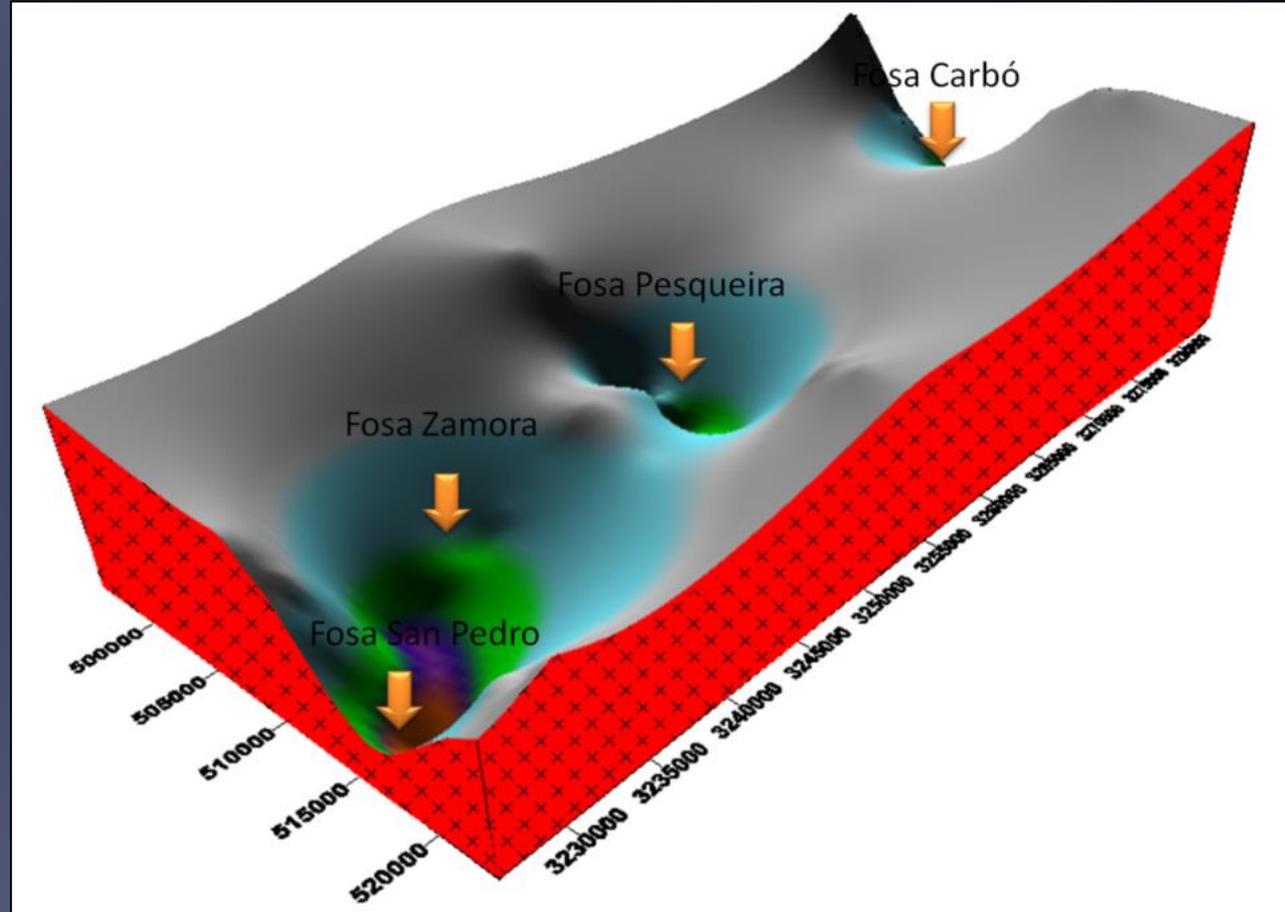


# \* Fosas



Se obtuvieron cuatro fosas con profundidades que van desde los 600 a las 900m.

Estas fosas se puede establecer que se trata de una depresión que contiene material sedimentario continental heterogéneo (conglomerados, gravas, arenas y arcillas) de consolidación variable.

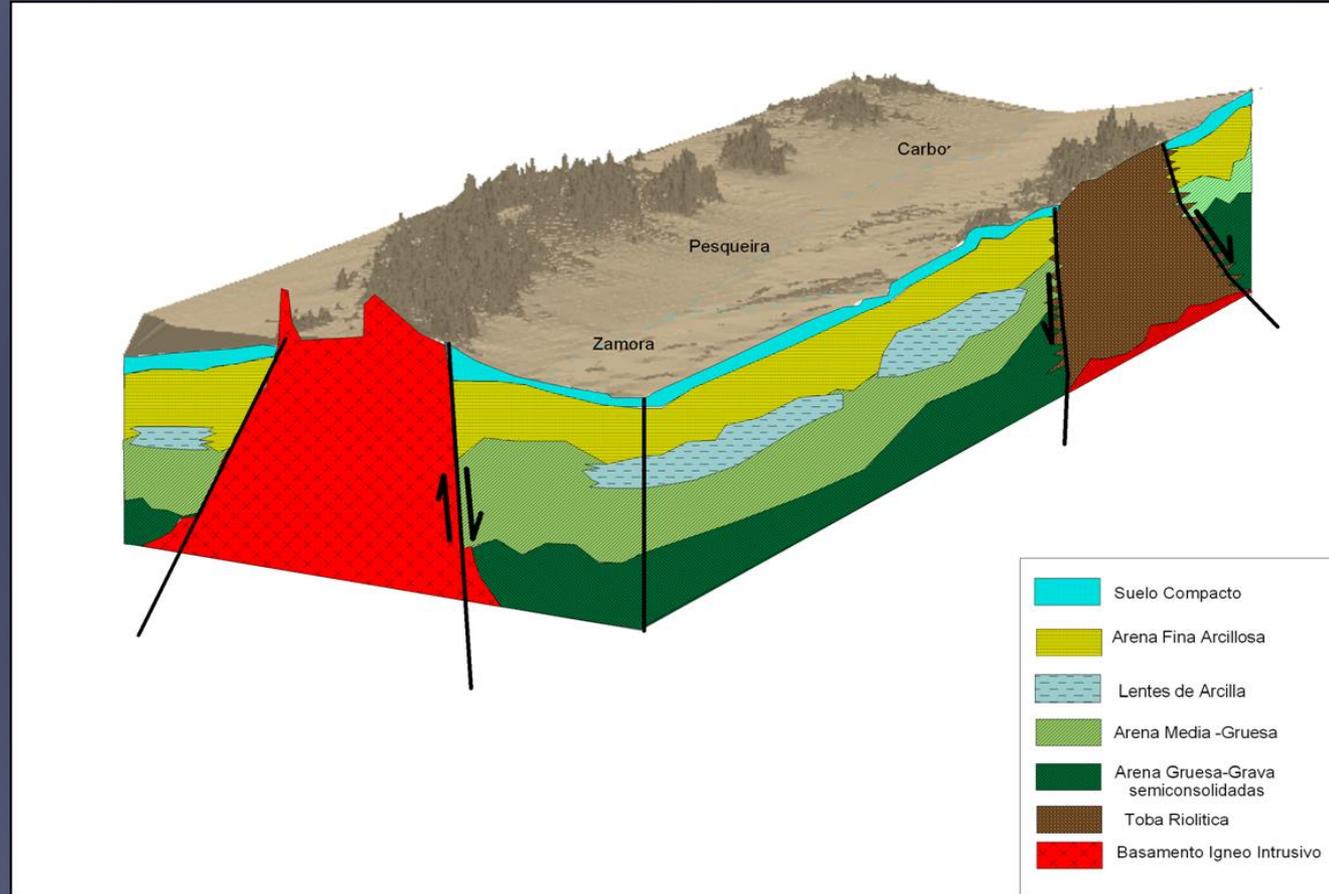




# \* MODELO GEOLÓGICO CONCEPTU



A partir de la reinterpretación geofísica y geológica del área se obtuvo el modelo geológico, donde se observan cuatro unidades litológicas principales.

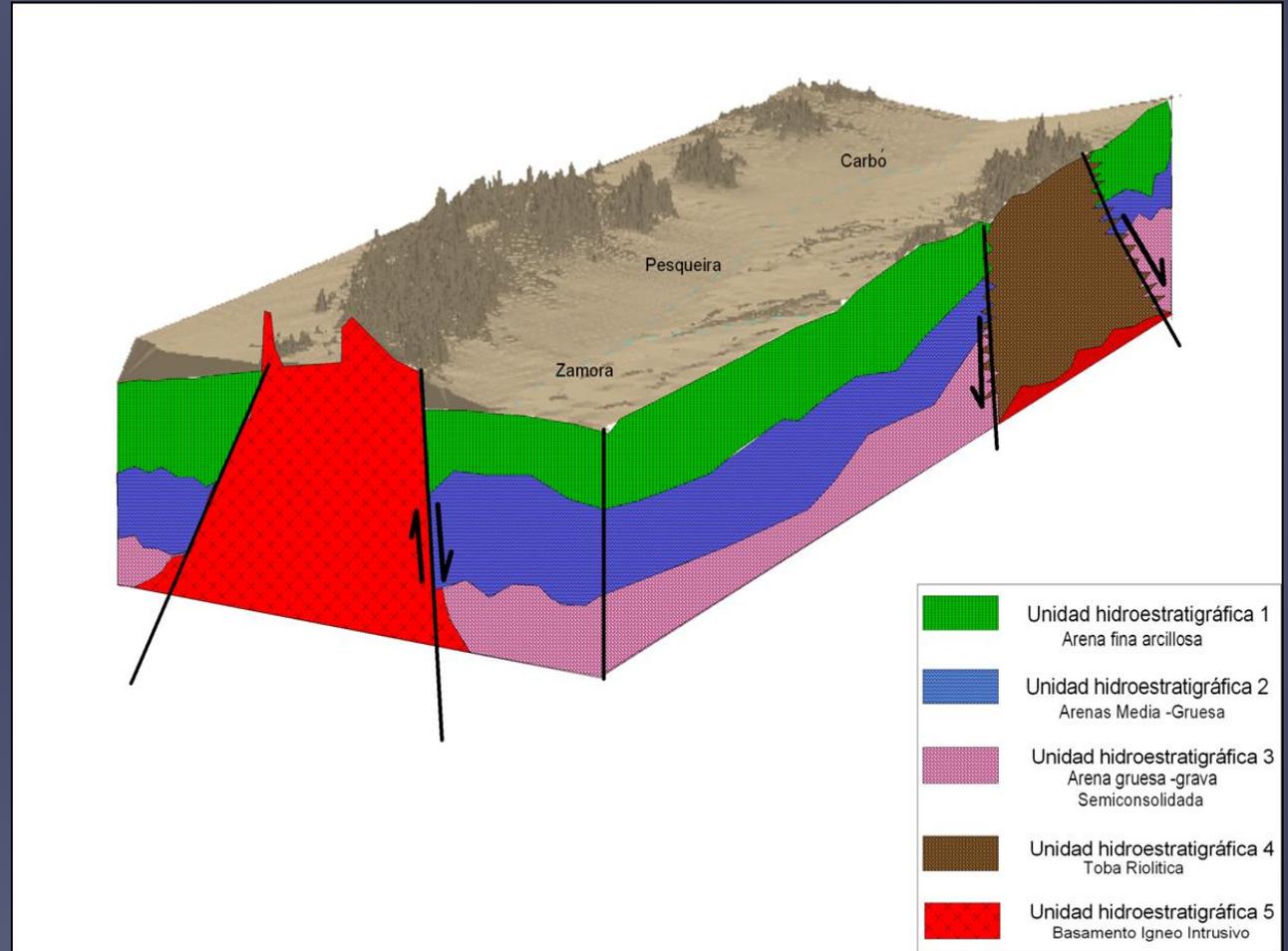




# \* MODELO HIDROGEOLÓGICO



De acuerdo con la información geológica y parámetros hidráulicos del acuífero se realizó un modelo conceptual con de unidades geohidrológicas, donde obtenemos 5 unidades geohidrológicas en el área de estudio.



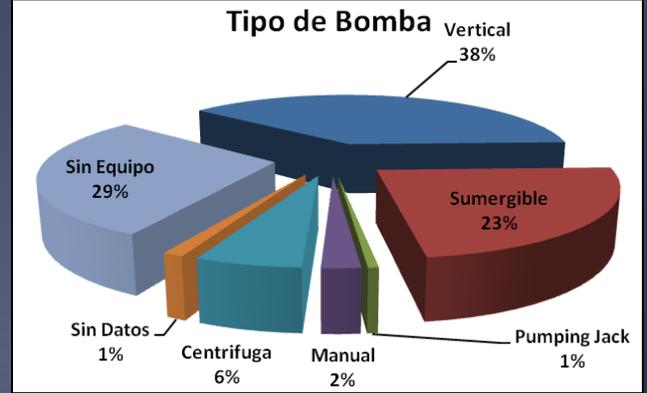
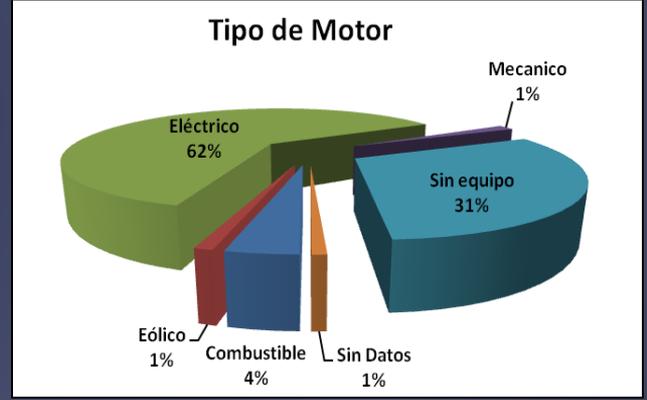
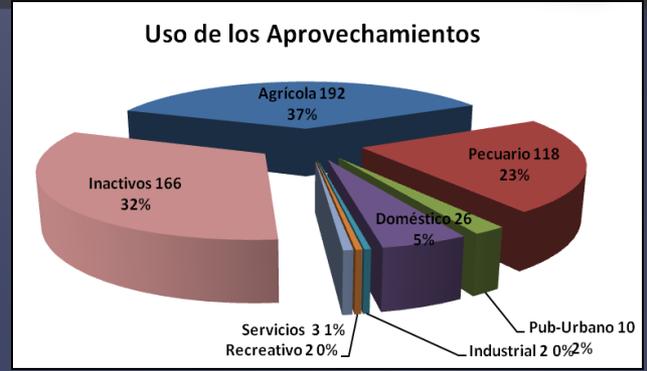
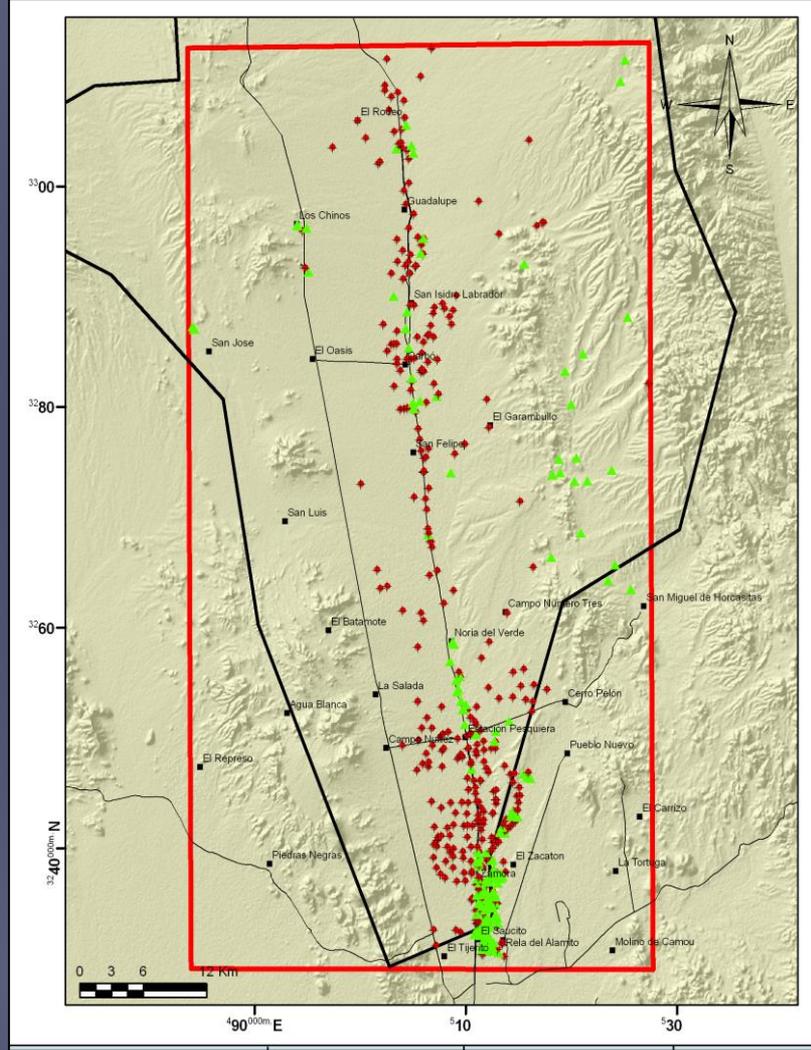


# CENSO DE APROVECHAMIENTOS



Se recopiló la información de 633 aprovechamientos levantados durante el 2007.

519 aprovechamientos  
- 354 pozos perforados  
- 165 Norias

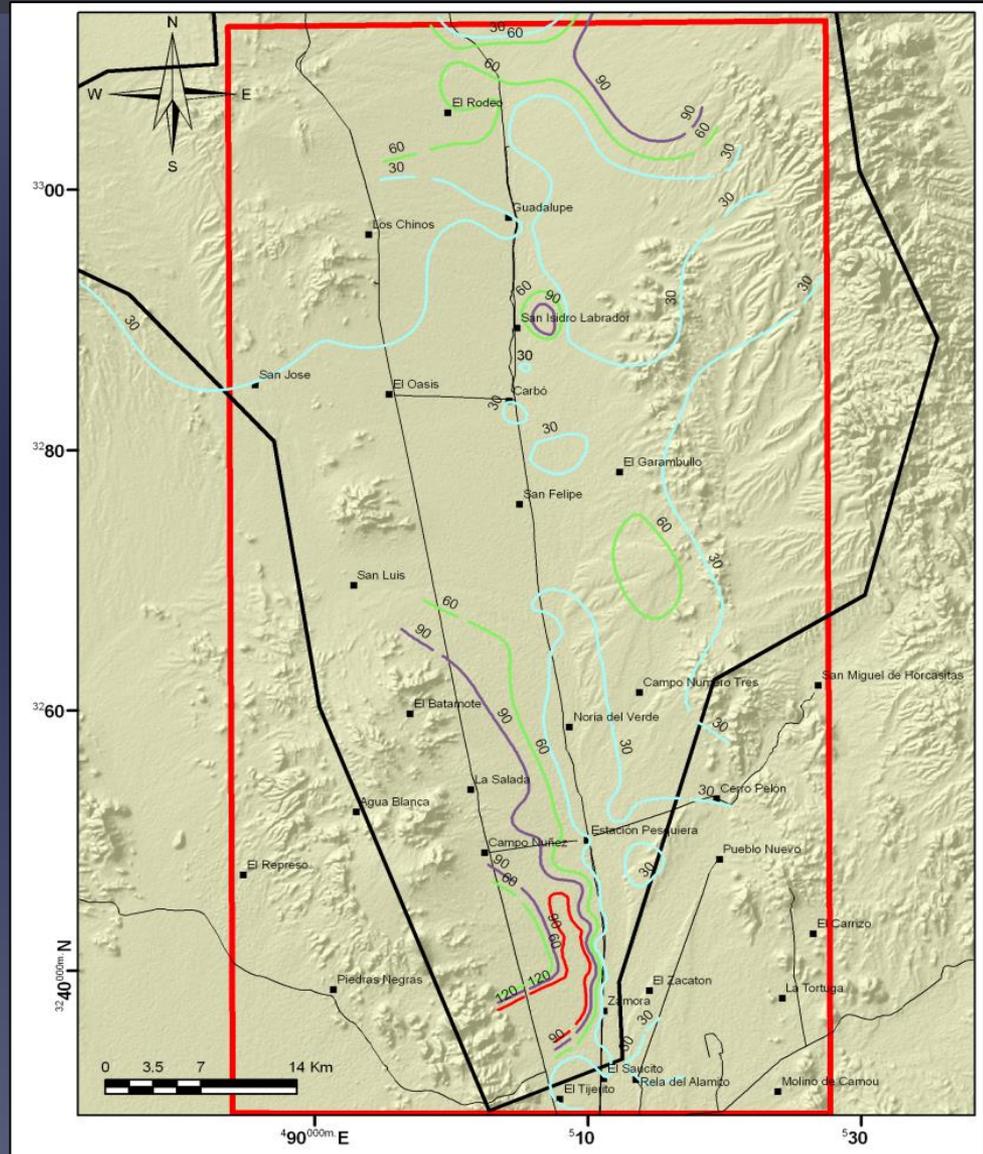




# PIEZOMETRÍA NIVEL ESTÁTICO 20



Los niveles más someros se presentan en la parte norte del área de estudio con valores de 30 a 60 m de profundidad, mientras que los valores más profundos se ubican en la parte sur a la altura del poblado estación Pesqueira y Zamora con 90 hasta los 120 m de profundidad.



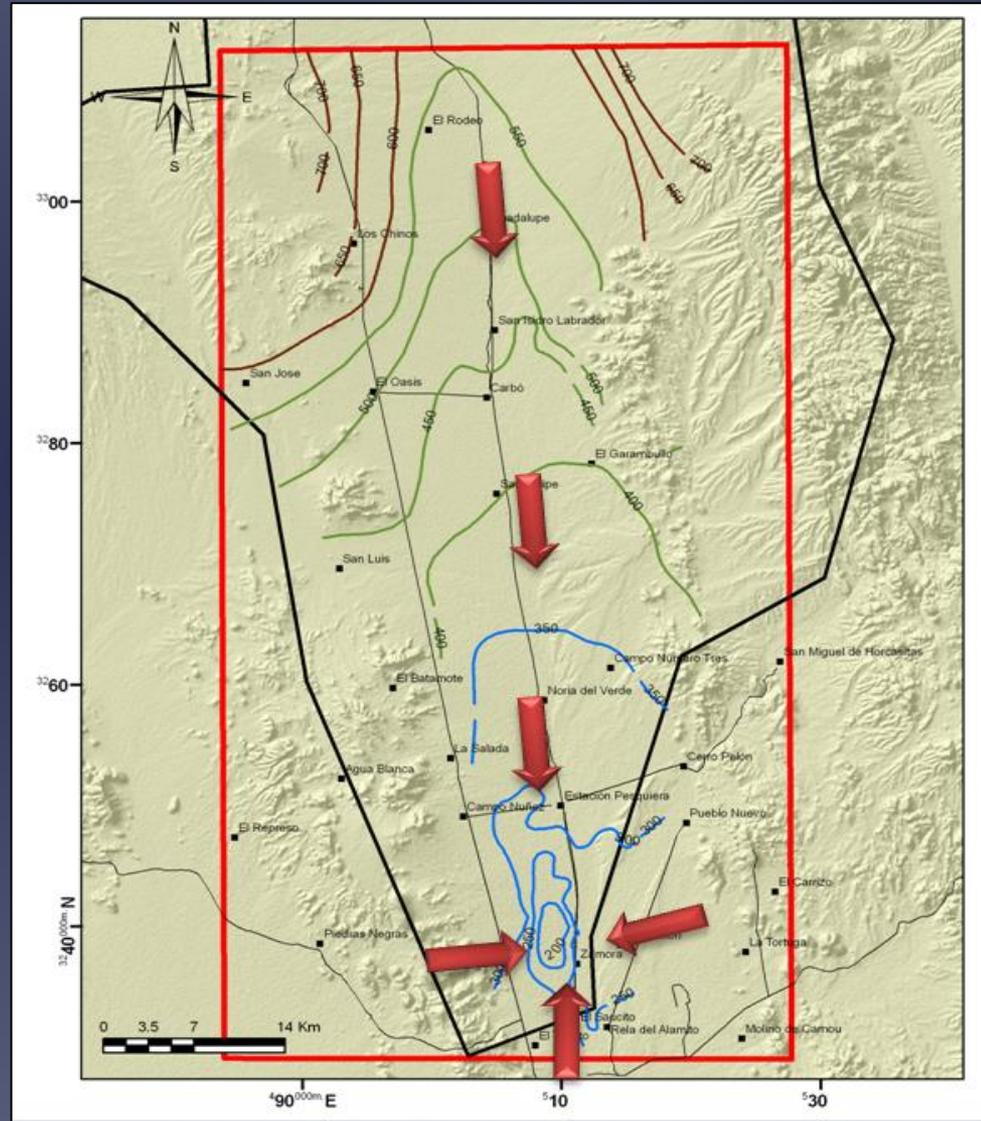


# ELEVACIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO 20



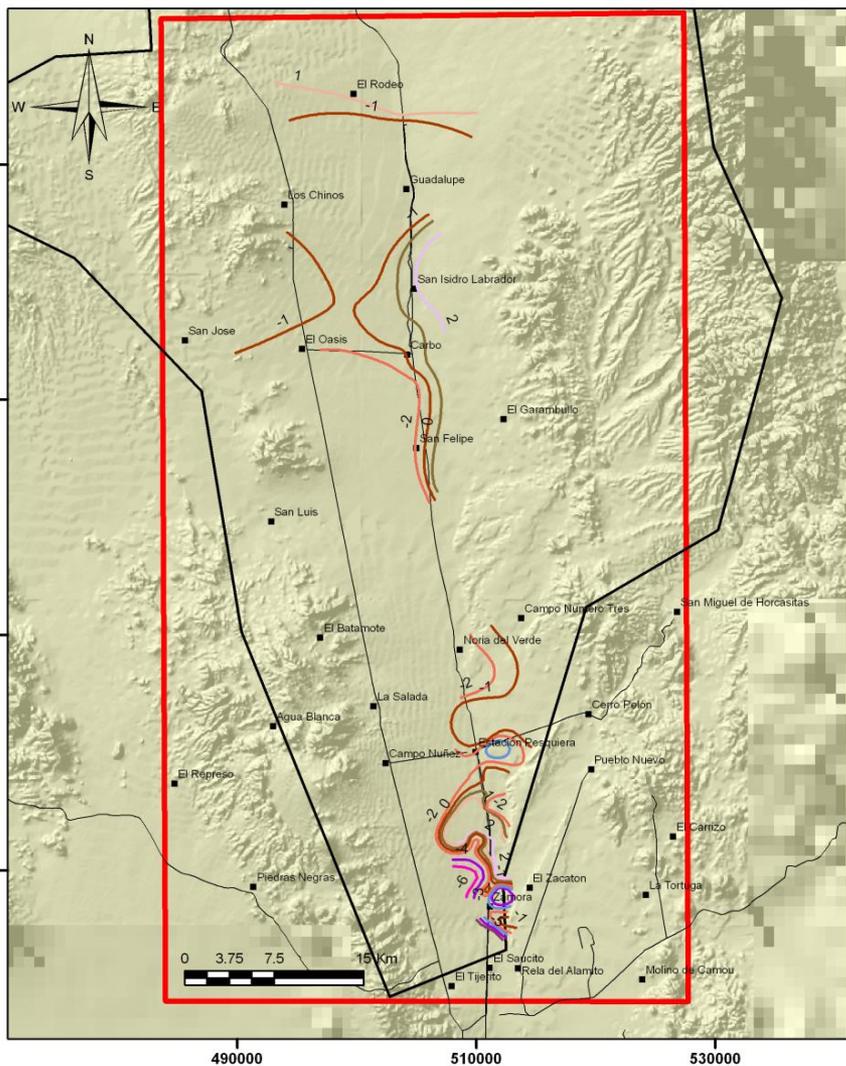
Las elevaciones mayores se presentan al norte del área de estudio con valores que van de 450 a 600 a la altura de los poblados Carbó y el Rodeo.

los valores más bajos se registraron al sur del área estudio a la altura de Pesqueira y el poblado Zamora con 350 a 200 m.s.n.m.

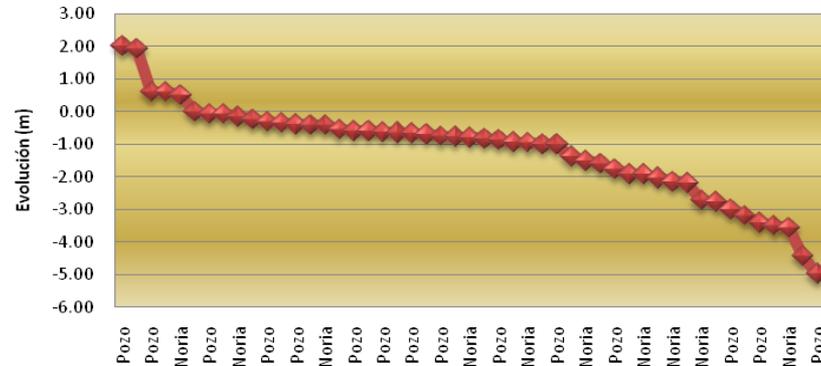




# EVOLUCIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO 2006-2007



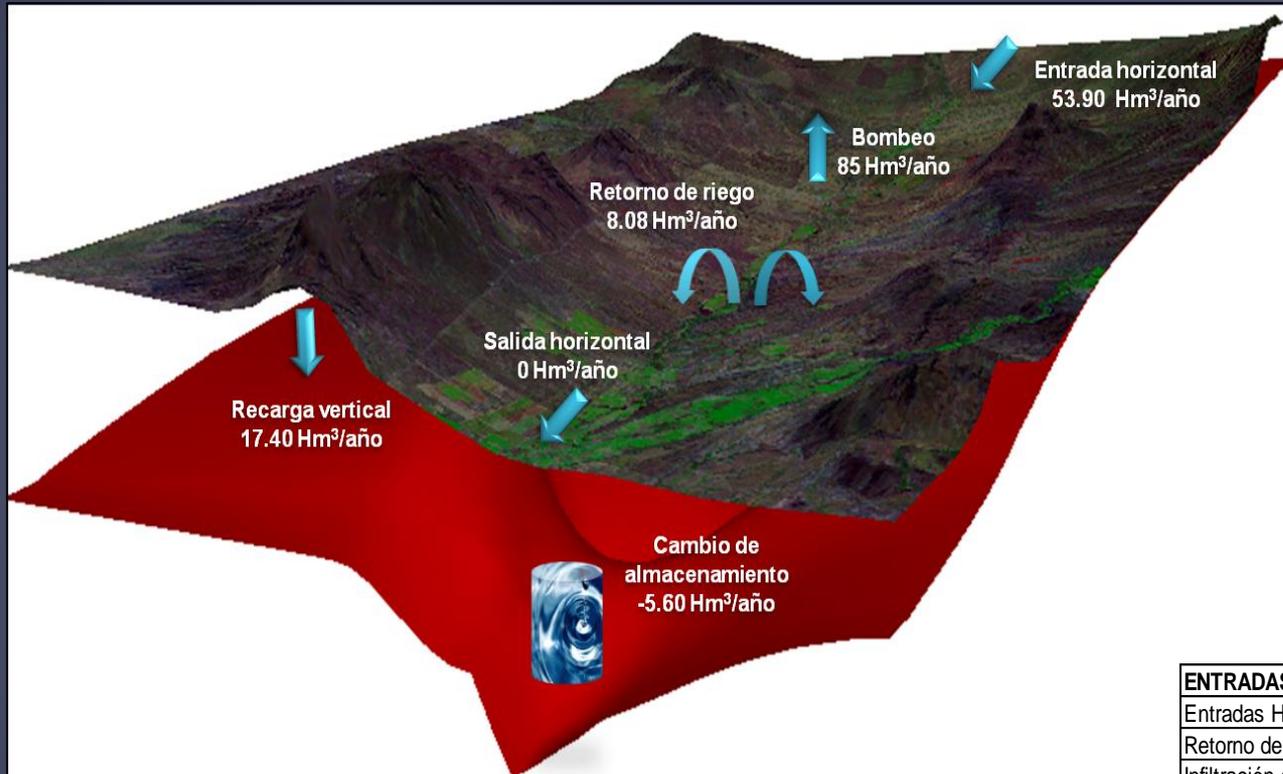
### Evolución 2006-2007



Se puede observar claramente la tendencia negativa tanto en pozos perforados como en norias, decayendo a valores de hasta -5 m.



# \* BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEA



ENTRADAS	m <sup>3</sup> /año
Entradas Horizontales (celdas de flujo)	53,906,104.06
Retorno de riego	8,085,915.61
Infiltración de cuerpos de agua	0.00
Recarga vertical	17,404,284.47
<b>Recarga Total</b>	<b>79,396,304.13</b>
SALIDAS	
Bombeo	85,000,000.00
Salidas Horizontales (celdas de flujo)	0.00
Descarga de manantiales (flujo base)	0.00
Evapotranspiración en niveles someros	0.00
<b>Salidas totales</b>	<b>85,000,000.00</b>
<b>CAMBIO DE ALMACENAMIENTO</b>	<b>-5,603,696</b>



# \* MODELACIÓN MATEMÁTICA



Los modelos son, por definición, aproximaciones y simplificaciones de un sistema natural.

Un modelo de aguas subterráneas es una representación de un sistema acuífero natural, existen varios tipos de modelos de aguas subterráneas: Los modelos conceptuales, modelos matemáticos.

Un modelo matemático de aguas subterráneas utiliza las ecuaciones de flujo y conservación de la masa para simular flujo de agua subterránea y transporte de solutos donde se incorporan los rasgos físicos del sistema natural como expresiones matemáticas:

Geología	➡	Propiedades hidráulicas
Fuentes	➡	Condiciones de frontera
Observaciones	➡	Parámetros de calibración



# \* MODELACIÓN MATEMÁTICA



Mod-Flow resuelve las ecuaciones diferenciales parciales usando el método de diferencias finitas, donde cada celda de Mod-Flow es un volumen unitario. En general la ecuación de flujo de aguas subterráneas que emplea Mod-Flow es la siguiente:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial x} (k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z})}_{\text{Flujo de aguas subterráneas entradas / salidas}} + \underbrace{W}_{\text{Fuentes y sumideros}} = \underbrace{Ss \frac{\partial h}{\partial t}}_{\text{Cambio de almacenamiento}}$$

Donde:

$K$  = conductividad hidráulica en las direcciones horizontal ( $x,y$ ) y vertical ( $z$ ).

$H$  = carga hidráulica.

$W$  = flujo volumétrico por unidad de volumen, que representa fuentes o sumideros de agua.

$Ss$  = coeficiente de almacenamiento específico del medio.

$t$  = tiempo.



# \* MODELACIÓN MATEMÁTICA



Parámetros de entrada - Usados para construir el modelo, del cual tenemos tres elementos importantes:

*Geometría del modelo*

Extensión del dominio horizontal y vertical, estructuras de las capas.

*Propiedades*

Conductividad hidráulica, porosidad, coeficiente de almacenamiento.

*Fronteras*

Localización, valores.

Observaciones - usadas para calibrar el modelo:

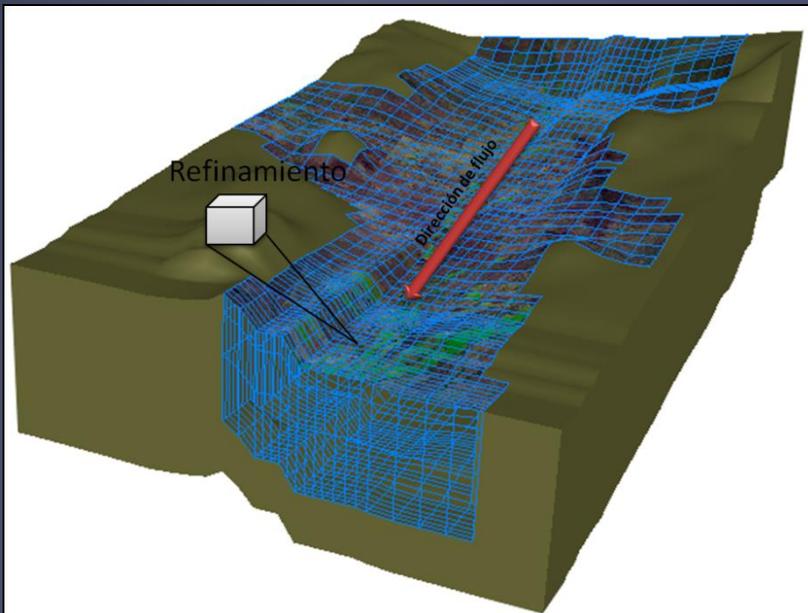
*Flujo* - Carga hidráulica, gradiente hidráulico.

Otro punto importante es definir las fronteras naturales que limitan al sistema de flujo de aguas subterráneas, esto definirá la extensión del área dentro de la cual es necesario obtener datos como:

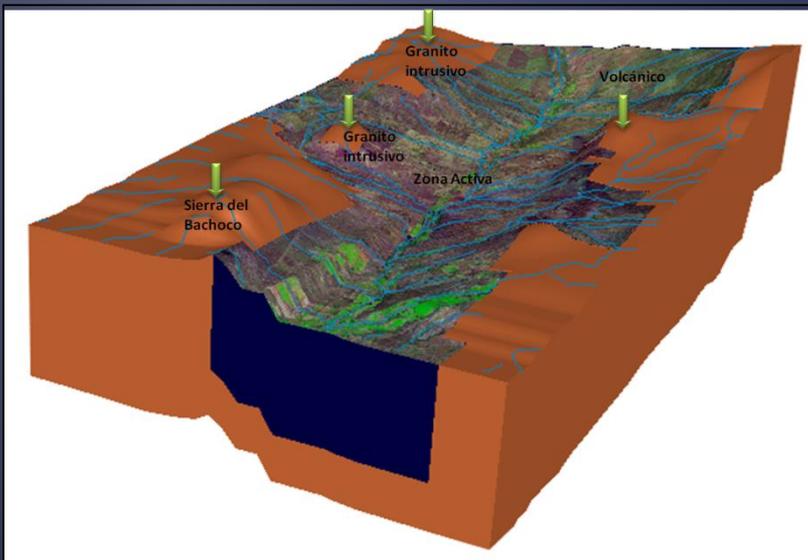
- Parteaguas geológicos
- Parteaguas de aguas superficiales
- Parteaguas subterráneos



# \* PARÁMETROS HIDRÁULICOS



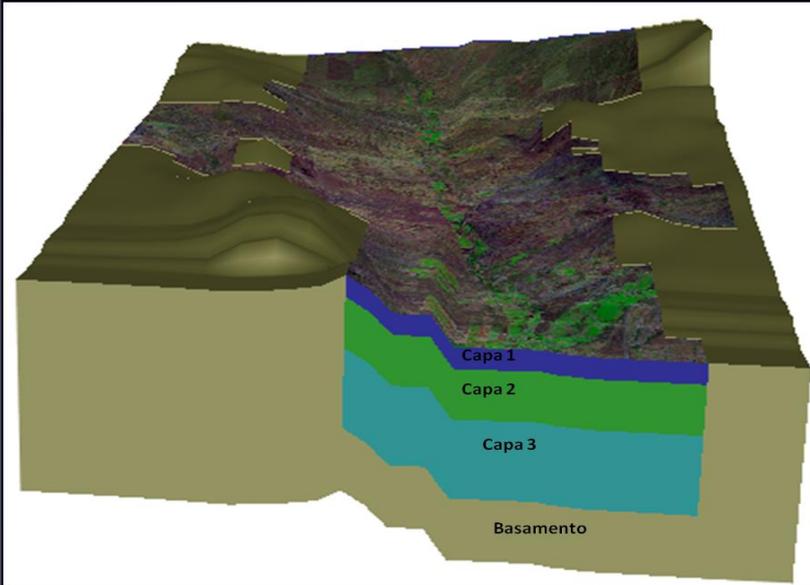
El tamaño de las celdas determina el nivel de detalle el modelo.



Las condiciones de fronteras o condiciones de borde son importantes para un modelo matemático ya que éstas nos definirán los límites hidráulicos del acuífero.



# \* PARÁMETROS HIDRÁULICOS



Se determinaron 4 capas importantes para el modelo;

✓ La primera capa consiste de suelo compacto y arenas arcillosas.

✓ La segunda que es la más importante y productiva, se compone por arenas gruesas y gravas.

✓ La tercera capa se compone de la Formación Baucarit.

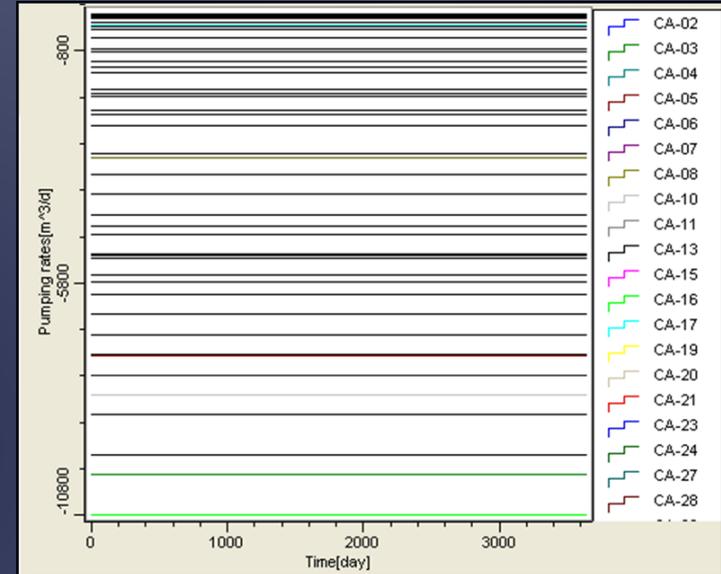
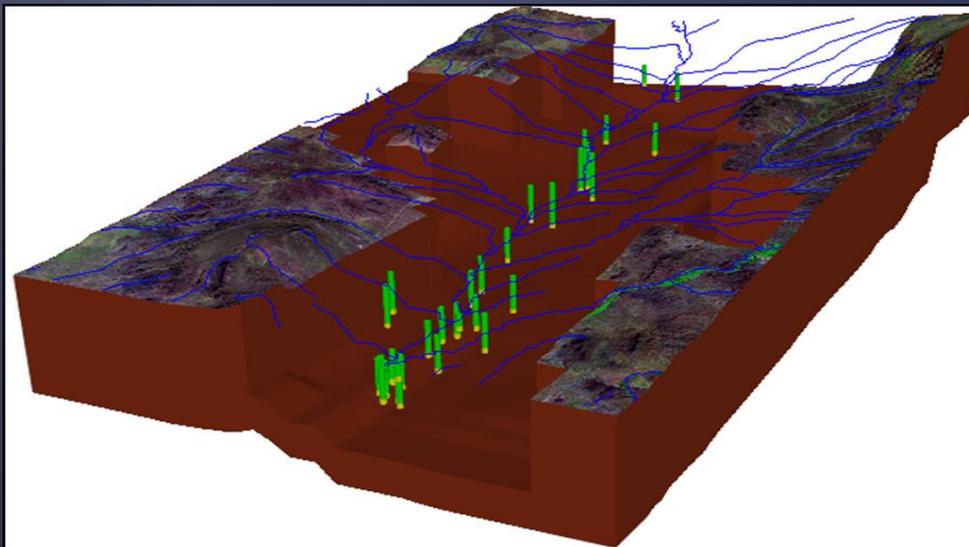
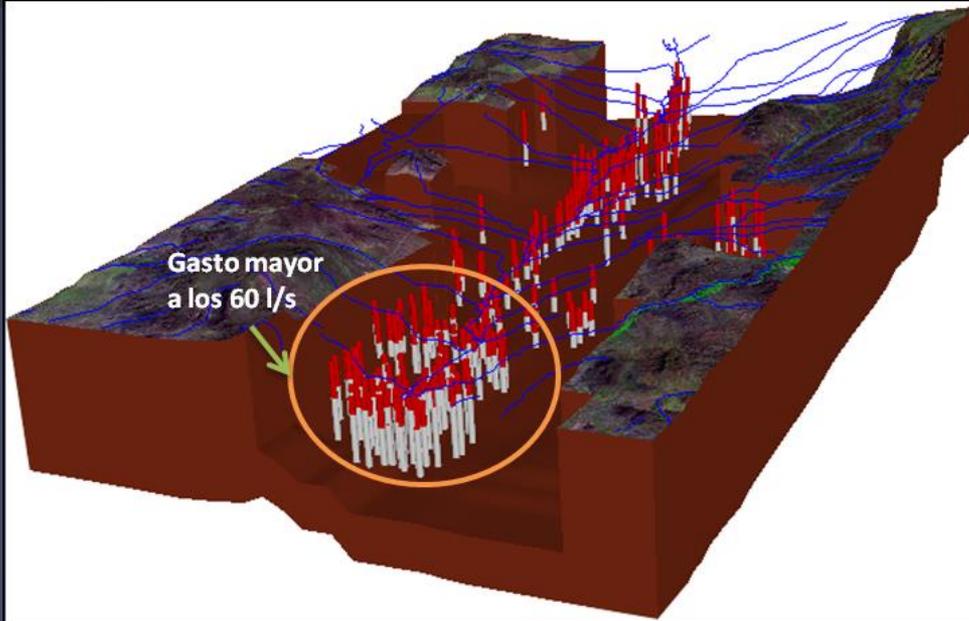
✓ La cuarta capa es el basamento granítico

Conductividad hidráulica se asignó valores desde  $10^{-4}$  m/s en la capa más productiva y las capas restantes de  $10^7$  y  $10^8$

Las conductividades se fueron ajustando de acuerdo a litología, perfiles eléctrico y calibración del modelo. |



# APROVECHAMIENTOS PARA EL MODO



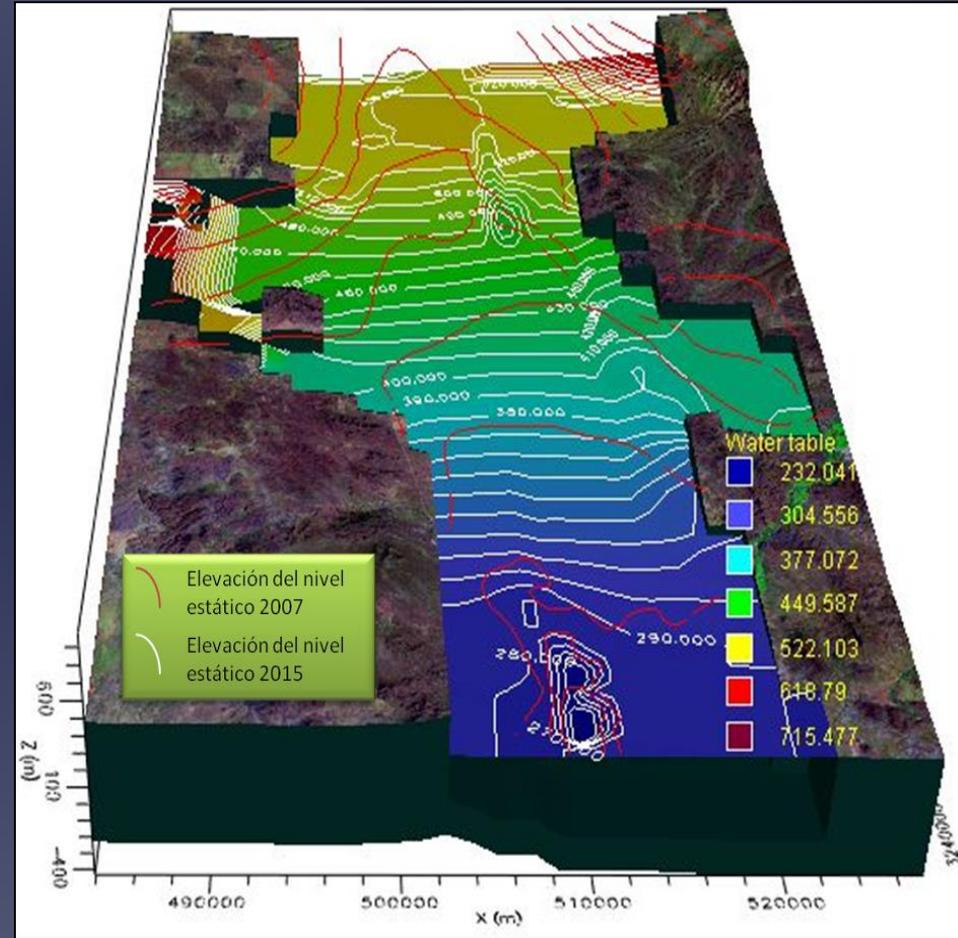
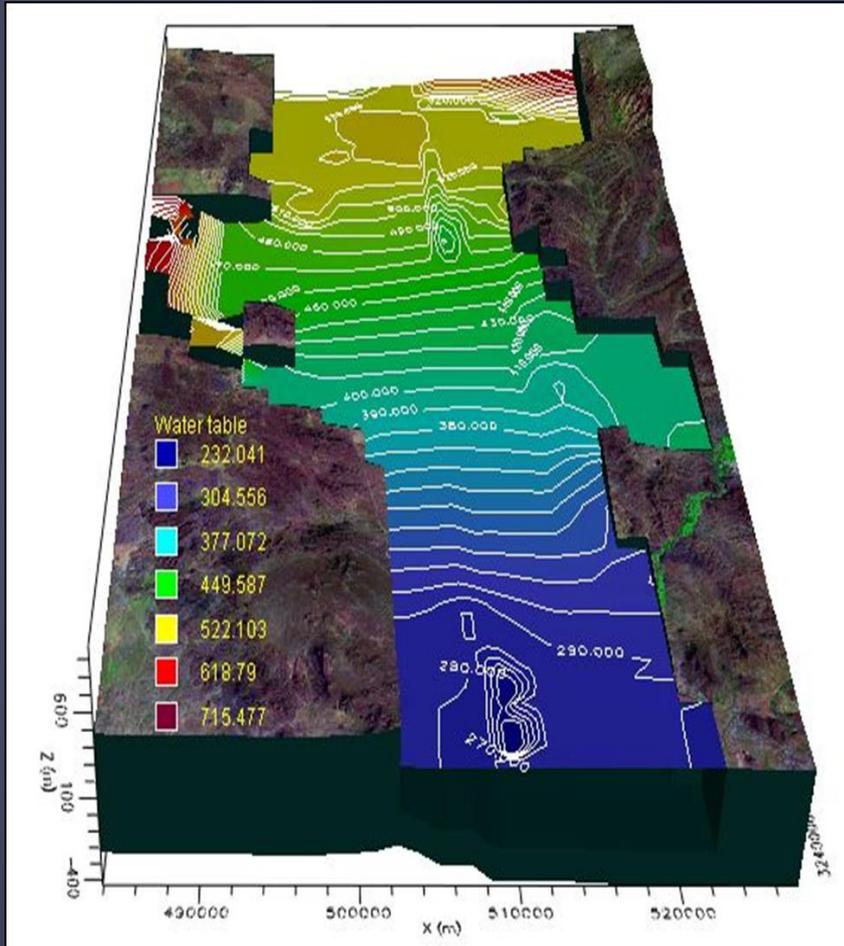
Se puede observar extracciones menores a los 89 L/seg hasta los 120 L/seg

-300 Pozos de bombeo

-32 Pozos de observación



# \* PREDICCIÓN 20





# \* CALIBRACIÓN WINPEST



PEST Control Window

Parameters | Prior Information | Objective Function | Controls

Parameter	PEST Name	Transformation	IsTiedTo	Param. Group	Limiting	Initial Value	Min	Max	Scale
Cndot1_Kx	Kx_1	log	none	Cndot	factor	0.1	1E-15	1E29	1
Cndot1_Ky	Ky_1	log	none	Cndot	factor	0.1	1E-15	1E29	1
Cndot1_Kz	Kz_1	log	none	Cndot	factor	0.01	1E-15	1E29	1
Cndot2_Kx	Kx_2	log	none	Cndot	factor	5E-7	1E-15	1E29	1
Cndot2_Ky	Ky_2	log	none	Cndot	factor	5E-7	1E-15	1E29	1
Cndot2_Kz	Kz_2	log	none	Cndot	factor	5E-8	1E-15	1E29	1

Parameter Groups

Param. Group	Pest Name	Incr. Type	Increment	Min. Incr.	FD Method	Incr. Multiplier	Central FD Method
Cndot	Cndot	relative	0.02	0	switch	2	parabolic

File Help

Parameters | Prior Information | Objective Function | Controls

Properties

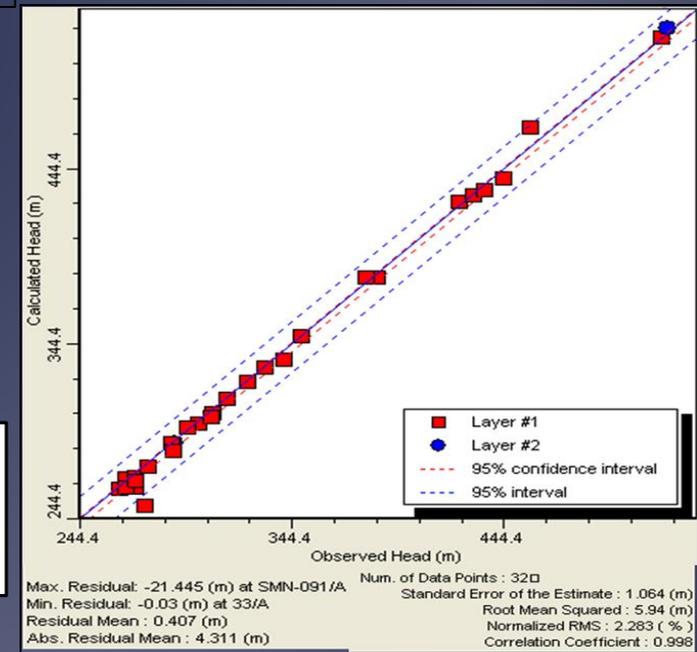
- Conductivity
  - #1
    - Kx = 0.1
    - Ky = 0.1
    - Kz = 0.01
  - #2
    - Kx = 5E-7
    - Ky = 5E-7
    - Kz = 5E-8
  - #3
  - #4
- Storage
- Recharge

WinPEST asigna un límite de valores de calibración a partir de los datos alimentados al modelo.

Existen dos procedimientos generales para la calibración: el ajuste manual por ensayo y error, y la estimación automatizada de parámetros (WinPEST).

Resumiendo en sí, la calibración es el ajuste de los parámetros o un grupo de propiedades hidráulicas o condiciones de frontera ajustadas, que concuerden con los valores medidos en campo dentro de un rango de error preestablecido.

PEST puede ayudar a determinar si el modelo conceptual es razonable para encontrar el peor y el mejor caso de predicción bajo condiciones calibradas.





# \* RESULTADOS



- La reinterpretación de 4 secciones gravimétricas permitió reconocer cuatro fosas principales con profundidades que van desde los 600 a los 900m y se denominaron Fosa Carbó, Fosa Pesqueira, Fosa Zamora y Fosa San Pedro.
- Se obtuvo una recarga vertical de  $17.40 \text{ Hm}^3/\text{año}$  y un cambio de almacenamiento de  $-5.60 \text{ Hm}^3/\text{año}$ , rectificando así un problema de abatimiento en la zona sur del área de estudio.
- El resultado del modelo presenta una zona de anomalía es decir una zona de abatimiento, causado principalmente por el sobrebombeo.
- Se estimó que el acuífero en su zona de abatimiento desciende a 4 m por año, considerando el bombeo de 365 días al año. No obstante muchos de los aprovechamientos censados trabajan en temporadas o ciertas horas durante el día por lo cual el valor se reduce 2 m/año como valor promedio correspondiente a la zona de abatimiento.
- Se implementó un modelo matemático del acuífero por medio del programa Mod-Flow. Mediante él Se predice el comportamiento para el año del 2015, a partir de las condiciones iniciales del 2005, donde se observa que en la parte sur del área de estudio se amplía la zona de afectación por sobrebombeo y la porción sur incrementa su deformación equipotencial hacia la porción norte y sur de área de modelación, para conformar un mayor cono de abatimiento, que podría interceptar la recarga hacia el acuífero Mesa del Seri-La Victoria.



# RECOMENDACIONES



- Se recomienda que a partir de la geometría del basamento obtenido, se realice un modelo matemático local a la altura del poblado de Zamora. Para ello se requiere afinar el modelo conceptual realizando sondeos eléctricos o perforaciones exploratorias que den un mayor conocimiento de la litología del área.
- Se debe establecer una red de monitoreo en las zonas afectadas y disminuir su bombeo de extracción e impedir mas el crecimiento de la zona de abatimiento.
- Es urgente llevar a cabo la reglamentación del acuífero, para definir el volumen máximo de extracción al que puede someterse ya que la realidad muestra que se está minando gravemente el almacenamiento.
- Es muy importante complementar la información obtenida por REPDA, ya que se encontraron en los levantamientos discrepancias en cuanto a la localización de los aprovechamientos y extracciones.
- Es urgente verificar que los volúmenes de extracción que reporta el titular de cada pozo sea exactamente el concesionado por CONAGUA.
- Es importante realizar un programa donde se lleve un control sucesivo y un orden de monitoreo permanente para mantener la actualización hidrogeológica continua del acuífero.
- Es importante desarrollar modelos a escalas más locales y someterlos a auditorias, actualizarlo con datos de mayor calidad y darle un seguimiento continuo a la predicción.



\* GRACIAS