



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE FLUJO
SUBTERRÁNEO. EN UN RÍO EN EL ESTADO DE
PUEBLA**

**INFORME ESCRITO PARA TITULACIÓN POR
OPCIÓN DE TRABAJO PROFESIONAL**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEÓLOGO

P R E S E N T A

CARLOS ALVAR JIMÉNEZ FABIÁN

TUTOR

Dr. JOSE ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

MÉXICO D.F.

2012

ÍNDICE

1.0	Introducción	1
2.0	Marco conceptual	1
2.1	<i>Localización</i>	2
2.2	<i>Orografía</i>	3
2.3	<i>Hidrografía</i>	4
2.4	<i>Clima</i>	5
2.5	<i>Flora y Fauna</i>	5
2.6	<i>Edafología</i>	5
2.6	<i>Marco geológico regional</i>	6
2.8	<i>Geología local</i>	7
2.8.1	<i>Jurasico Medio (Jm)</i>	7
2.8.2	<i>Jurasico Superior (Js)</i>	7
2.8.3	<i>Cretácico Inferior (Ki)</i>	8
2.8.4	<i>Cretácico Superior (Ks)</i>	8
2.9	<i>Hidrología</i>	9
2.9.1	<i>Porosidad</i>	10
2.9.2	<i>Permeabilidad</i>	10
2.9.3	<i>Tipo de acuífero</i>	10
3.0	Objetivos	11
4.0	Metodología	11
4.1	<i>Ubicación y perforación de los sondeos</i>	11
4.2	<i>Mediciones piezométricas</i>	13
4.3	<i>Desarrollo de los sondeos</i>	13
4.4	<i>Muestreo de agua subterránea y superficial</i>	14
4.5	<i>Prueba Slug</i>	15
5.0	Resultados	18
5.1	<i>Construcción de la sección hidrogeológica</i>	18
5.2	<i>Elaboración de la red de flujo de agua subterránea</i>	20
5.3	<i>Determinación de la Permeabilidad y Velocidad del Flujo Subterráneo mediante pruebas Slug</i>	21
5.3.1	<i>Sondeo 1</i>	23

5.3.1.1	Permeabilidad	23
5.3.1.2.	Velocidad de flujo subterráneo	24
5.3.2.	<i>Sondeo 2</i>	24
5.3.2.1	Permeabilidad	24
5.3.2.2	Velocidad de flujo subterráneo	24
5.3.3	<i>Sondeo 3</i>	24
5.3.3.1	Permeabilidad	24
5.3.3.2.	Velocidad de flujo subterráneo	24
5.3.4	<i>Sondeo 4</i>	25
5.3.4.1	Permeabilidad	25
5.3.4.2.	Velocidad de flujo subterráneo	25
5.3.5	<i>Sondeo 5</i>	25
5.3.5.1	Permeabilidad	25
5.3.4.2.	Velocidad de flujo subterráneo	25
6.0	Conclusiones	27
7.0	Bibliografía	28
8.0	Anexos	28
	Anexo 1. Diseño final de los sondeos	29
	Anexo 2. Corte litológico de los sondeos	34
	Anexo 3 Control de datos de las pruebas Slug	39
	Anexo 4 Anexo fotográfico.....	47

1.0 Introducción

En esta zona del río, el valle es muy profundo con pendientes muy pronunciadas que incluyen una pared casi vertical de 50 m de altura situada en el borde norte del cauce. La ladera sur cuenta con una pendiente media aproximada de 50%, pero existen zonas de menor pendiente adecuadas para situar las pilas minimizando las excavaciones.

La obra estará soportado por seis pilas y dos estribos, la pila central será la de mayor altura (220 m) y se ubica en las márgenes de la corriente del río sobre la plataforma natural del río, dicha plataforma es de 50 m de ancho y está pegada a la pared casi vertical de la ladera norte. Se colocó un promontorio de arena y grava como barrera artificial para poder aislar la corriente del río de la zona de construcción en la margen derecha del río hacia la ladera sur..

El diseño original de la zapata contemplaba 64 pilotes de 1.40 m de diámetro pero el agua presente en el área de construcción influyo a modificar el diseño original y a utilizar otras técnicas de construcción.

Ante esta problemática se tuvo que evaluar las condiciones hidrogeológicas locales del sitio para poder determinar la permeabilidad, la dirección de flujo de agua subterránea y la velocidad de flujo de la misma.

Para poder cumplir con este objetivo se ubicaron 5 puntos en la margen derecha del río en donde se perforaron e instalaron los sondeos a profundidades que van de 12 a 26 m. El material de recorte producto de la perforación se analizo para poder realizar el corte litológico de la zona de estudio. Una vez terminadas las obras de perforación y equipamiento de los sondeos, se realizo la nivelación topográfica y las mediciones de la profundidad del nivel estático de los sondeos para poder generar la red de flujo.

Para poder calcular la permeabilidad y la velocidad de flujo subterráneo se realizo una prueba de tipo Slug la cual consistió en inyectar agua en los 5 sondeos para medir su recuperación. Estos datos se procesaron para obtener estas dos propiedades físicas.

Finalmente para determinar la composición química del agua, que nos permitió saber si existe más de un tipo de la misma, se realizaron 6 muestreos, en los sondeos 1, 2 y 4, y en el río ubicados aguas arriba y aguas abajo, además de un muestreo en un manantial ubicado aguas abajo.

2.0 Marco conceptual

La zona de estudio se localiza en el acuífero de Poza Rica, el cual cubre la porción norte del estado de Veracruz y abarca una porción al norte del estado de Puebla. El área del acuífero es de 2,780 km².

El acuífero de Poza Rica limita al norte con el acuífero Álamo-Tuxpan, estado de Veracruz, al sur con el acuífero Tecolutla, al suroeste con el acuífero Acaxochitlan y al este con el Golfo de México.

Este acuífero se encuentra dentro de la provincia fisiográfica Llanura Costera del Golfo en la porción este del acuífero, la cual se encuentra cubierta por una cuña de rocas sedimentarias consolidadas y no consolidadas del Cenozoico. Estos sedimentos descansan sobre las rocas del Mesozoico y tienen un espesor que varía de pocos metros, cerca de sus límites hacia tierra, a más de 6,000 m en la zona costera. Las rocas cenozoicas consisten en su mayoría en arena, limo y arcilla, derivados de la erosión de las zonas continentales altas. Los sedimentos más antiguos de la planicie costera son de edad cretácica y consisten en rocas de origen marino con una permeabilidad mínima. La parte oeste del acuífero se encuentra dentro de la provincia fisiográfica Sierra Madre Oriental que se encuentra conformada por una cadena montañosa de origen estructural, formada por una serie de plegamientos alargados orientados al NNW-SSE, cuya edad va desde el Paleozoico al Eoceno Superior.

2.1 Localización

El municipio de Xicotepéc de Juárez, se localiza en la Sierra Madre Oriental, entre los ríos San Marcos y Necaxa. Las coordenadas geográficas son 20^a 17' latitud norte y 97^a 57' longitud oeste. Al norte, limita con el municipio de Jalpan, al sur con el municipio de Tlaola, al oriente con los municipios de: Zihuateutla y Juan Galindo, y al poniente con el municipio de Tlacuilotepec, (Figura 2.1).

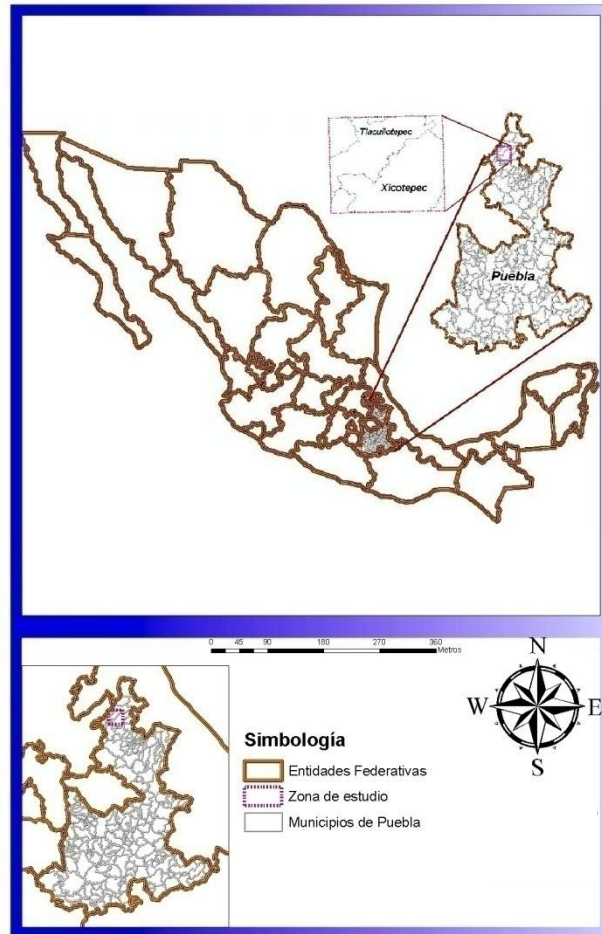


Figura 2.1. Localización del área de estudio en el Municipio de Xicotepec, estado de Puebla de los Ángeles.

2.2 Orografía

El municipio pertenece a dos regiones morfológicas de la cota 1, 000 hacia el noroeste, al declive del Golfo y de la misma cota hacia el sureste a la Sierra Negra.

El declive del Golfo es el declive septentrional de la Sierra Norte hacia la llanura costera del Golfo y se caracteriza por sus numerosas chimeneas volcánicas y lomas aisladas; en tanto que la sierra norte o sierra de Puebla está formada por sierras más o menos individuales, paralelas, comprimidas unas con las otras y suelen formar grandes o pequeñas antiplanicies intermontañas que aparecen frecuentemente escalonadas hacia la costa.

La porción occidental del municipio es bastante accidentada ya que; presenta constantes ascensos y descensos que muestran, una tendencia a declinar abruptamente. Destacando una serie de cerros y sierras pequeñas como el Nactanca, Peña Blanca, Las Pilas, entro otros, aunque cabe destacar una zona más o menos plana, donde se asienta la ciudad de Xicotepec de Juárez.

La porción oriental muestra un relieve diferente. Se alcanzan dos grandes Mesas, la Junta y Planada con más de 10 km de largo y 4 de ancho. Su descenso hacia el río Metate y San Marcos es abrupto.

Su altura con respecto al mar oscila entre 200 y 1,600 m

2.3 Hidrografía

El municipio de Xicotepec de Juárez cuenta con numerosos escurrimientos y es beneficiado por los vientos alisios y las corrientes marinas provenientes del Golfo de México, cuyas precipitaciones caen desde las partes más bajas a las partes más altas. Los ríos más importantes son el de San Marcos y El Necaxa, (Figura 2.2). La gran cantidad de manantiales de agua apta para consumo humano diseminados por el municipio, entre los que se encuentra uno termal, son la causa de diversos arroyos intermitentes. Los arroyos más importantes son: El Apatlauco, El Cilima, El Xolintla, El Nextlalpan, El Magdalena y el Tlaxcalantongo. En la ciudad existen manantiales: Los Texontles, El Tarro, La Tejería, Los Lavaderos, La Pagua, Duraznotla y Xochipila, los que contribuyen al aumento del caudal de los arroyos intermitentes que atraviesan la población por cauces naturales que desembocan en la Xochipila. La precipitación media anual es de 2,720 mm., llueve todo el año. El periodo de lluvias más intenso se presenta de junio a octubre.



Figura 2.2 Principales ríos en el municipio de Xicotepec, estado de Puebla de los Ángeles.

2.4 Clima

La variabilidad de altitudes existentes en el municipio provocan dos tipos de clima y dos microclimas, o subgrupos climáticos en función de la precipitación, temperatura y presión atmosférica de cada lugar. Los climas principales son:

Cálido Húmedo: se encuentran en una elevación de 300 a 800 msnm. En esta altitud existe un microclima localizado a partir de Tulancinguillo, que corre hacia la parte baja del Tabacal y sigue por la Chivería y río San Marcos.

Semi Cálido-Húmedo: se encuentra en una elevación de 800 a 1,230 msnm. En estas altitudes se localiza otro microclima a partir de la parte oriente del cerro Xicotepec y corre hacia la depresión de Xochipila y continúa por Los Perales, Duraznotla, La Rivera, por el cerro Mextépetl, hasta San Agustín Atlihuac. La temperatura media en el municipio es de 22°C.

2.5 Flora y Fauna

La vegetación principal en el municipio es del tipo: selva alta perennifolia secundaria, pastizal cultivado, pastizal inducido, bosque mesotilo de montaña, bosque de ocozote, bosque de encino y bosque de encino-pino.

Con respecto a la fauna, existen especies como el xicote, tigrillo, zorra, jabalí, armadillo, ardilla, tlacuache, hurón, conejo, venado temazate, tejón, mapache, tuza, marta, coyote, zorrillo, rana, sapo, tarántula, avispa, abejorro, abeja.

2.6 Edafología

El municipio de Xicotepec de Juárez presenta gran diversidad edafológica en su territorio se identifican cinco grupos de suelos (Figura 2.3):

- **Cambisol:** son adecuados para actividades agropecuarias, con actividad moderada a buena, según la fertilización a que sean sometidos; por ser arcillosos y pesados, tienen problemas de manejo. Se localiza en una extensa área del extremo oriente y en la porción central presenta fase lítica (roca a menos de 50 cm de profundidad).
- **Acrizol:** suelos muy pobres en nutrientes. Adecuados para explotación forestal o practicultura. Pueden dedicarse a actividades agropecuarias mediante fertilización y encalado frecuente y son de productividad baja. Se presenta en áreas dispersas del municipio.
- **Regosol:** suelos formados por material suelto que no sea aluvial reciente, como dunas, cenizas volcánicas, playas, entre otros. Su uso varía según su origen; son

muy pobres en nutrientes, prácticamente infértiles. Se presentan en extensas áreas al suroeste, centro y noreste, presenta fase lítica o gravosa.

- Vertisol: suelos de textura arcillosa y pesada que se agrietan notablemente cuando se secan. Se localiza en áreas reducidas a lo largo del río Cilima.
- Litosol: son suelos de 10 centímetros de espesor sobre roca o tepetate. No son aptos para cultivos de ningún tipo y sólo pueden destinarse a pastoreo. Se presenta en una franja en la porción meridional.

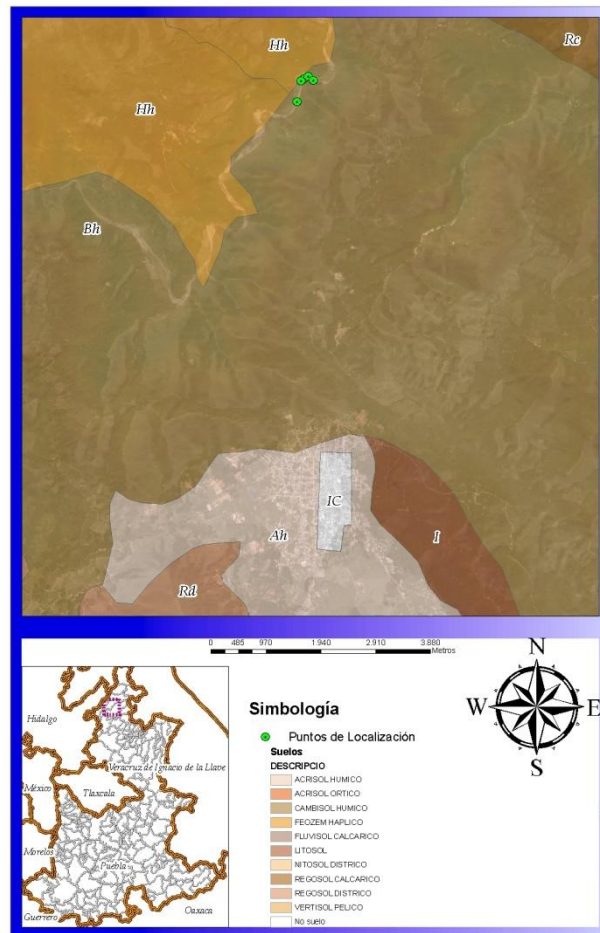


Figura 2.3. Edafología en el municipio de Xicoteppec, estado de Puebla de los Ángeles.

2.6 Marco geológico regional

La geología en el estado de Puebla está constituida por un basamento metamórfico del Precámbrico, en el cual se ha podido apreciar que existen diferentes grados y facies de metamorfismo. Este basamento aflora únicamente hacia la parte sur del estado, en la zona limítrofe con el estado de Oaxaca. Sobre este complejo descansa en discordancia una secuencia metamórfica del Paleozoico inferior conocida como Complejo Acatlán (Ortega-Gutiérrez, 1978), la cual está cubierta discordantemente por rocas de origen deltaico continental del Paleozoico superior (Formación Matzitzi).

El Mesozoico está representado por una secuencia sedimentaria marina y continental que va del Triásico Superior al Cretácico Superior, así como por una secuencia de rocas vulcanosedimentarias y rocas miloníticas del Mesozoico.

Por otra parte, en el sector centro-meridional del territorio estatal, en la localidad de Tepexi de Rodríguez, se localiza la cantera Tlayúa que, dada la abundancia, variedad y conservación de su paleobiota, constituye una de las localidades fosilíferas cretácicas más importantes de América del Norte. La edad de esta cantera está referida al Albiano (Pantoja-Alor, 1992, Applegate, 1992) y se localiza aproximadamente a 60 km al SE de la ciudad de Puebla, en terrenos de la Mixteca alta.

2.8 Geología local

En la zona podemos observar rocas del Mesozoico, que corresponden a rocas de origen continental y marino del Jurásico Medio y Superior, así como del Cretácico Inferior y Superior. A continuación se describen las unidades que afloran en el área de estudio (Figura 2.4):

2.8.1 Jurásico Medio (Jm)

Esta unidad consiste en una secuencia de limolitas, areniscas y conglomerados que constituyen a la Formación Cahuwasas. Esta serie detrítica fue depositada en un ambiente continental y ocasionalmente se observan intercalaciones de grauvacas y areniscas conglomeráticas.

Los afloramientos de esta formación son escasos, encontrándose preferentemente al norte del estado, en Huahuaxtla y Xicotepéc de Juárez. Sobreyace discordantemente a la Formación Huayacocotla del Jurásico Inferior su morfología corresponde a sierras alargadas orientadas en dirección NW-SE. Esta serie litológica se correlaciona también con la Formación Todos los Santos que aflora en el estado de Veracruz

2.8.2 Jurásico Superior (Js)

Esta unidad está representada por una alternancia de calizas, lutitas y margas depositadas en ambiente marino de facies de plataforma, así como calizas microcristalinas en ocasiones de tipo grainstone de las Formaciones Tamán y Pimenta, principalmente.

La caliza varía texturalmente de mudstone a wackestone e incluso packstone constituido por calcita microcristalina, fósiles de radiolarios calcificados, fragmentos de ostrácodos y pelecípodos. Las lutitas son de color gris y negro, ocasionalmente bituminosas y con

impresión de pequeños pelecípodos y amonites mal conservados. Afloran al norte del estado, en San Esteban Cuautempan y Zacapoaxtla.

2.8.3 Cretácico Inferior (Ki)

El Cretácico Inferior está constituido fundamentalmente por una secuencia carbonatada con algunos horizontes terrígenos (lutitas y areniscas) hacia su base, ya que la transición del Jurásico Superior hacia el Cretácico Inferior es gradual. El ambiente de depósito de las rocas que constituyen la base de este periodo es de tipo de plataforma, dadas las características texturales que presenta. Como ejemplo de este tipo de rocas se tiene a la Formación Zapotitlán. La parte superior presenta horizontes de lutitas calcáreas con intercalaciones de areniscas calcáreas (Formación San Juan Raya) y una secuencia de calizas que incluye a las Formaciones Miahuatepec, Orizaba y Tamaulipas.

La Formación Miahuatepec está formada por calizas de color gris a gris oscuro con fracturas rellenas de calcita, en estratos de 70 cm a 2 m. Ocasionalmente, se encuentra interestratificada con capas arcillosas que incluyen nódulos y bandas de pedernal y margas de color crema, su relación con las rocas subyacentes es discordante.

La Formación Orizaba está formada por calizas parcialmente dolomitizadas de color gris a gris claro, de textura wackestone, de estratificación gruesa a masiva, y ambiente de plataforma, lagunar a post-arrecifal, con rudistas, subyace concordantemente a las calizas del Cretácico Superior.

La Formación Tamaulipas Superior consta de calizas de textura mudstone de color gris oscuro en capas de 50 cm a 1 m, con nódulos de pedernal y líneas estilolíticas bien desarrolladas. Su ambiente de formación es de cuenca profunda y su morfología es de sierras escarpadas.

Estas unidades están ampliamente distribuidas en el área en donde se realizó este estudio hidrogeológico. Las calizas se encuentran aflorando en las márgenes del río. Estas presentan estratos que van de 50 cm a 1 metro de espesor de color crema al intemperismo y color gris claro al fresco. Yendo hacia la parte superior se aprecian calizas de color crema al intemperismo y gris fuerte al fresco y presentan bandas de pedernal de 5 cm de espesor los estratos que afloran en esta zona tienen un espesor de 1 metro.

2.8.4 Cretácico Superior (Ks)

El Cretácico Superior está representado por la Formación Atoyac. Consta de calizas de textura wackestone color crema en capas gruesas a masivas con numerosos rasgos de disolución, fragmentos de pelecípodos, de ambiente lagunar y post arrecifal, aflora al norte de Tehuacán. La Formación Soyatal es una secuencia calcáreo-arcillosa de carácter rítmico alternante originada en un marco tectónico de regresión marina. Presenta calizas y lutitas de

10 a 30 cm con intercalaciones de margas color pardo rojizo. El contacto con las rocas del Cretácico Inferior es transicional. La Formación San Felipe consta de una secuencia de calizas compactas de textura mudstone y calcarenitas en capas de 2 a 20 cm de color gris con lutitas bentoníticas el contacto con la Formación Agua Nueva es concordante y transicional. Esta formación consta de calizas y lutitas con intercalación de nódulos y bandas de pedernal y subyace de igual modo a las lutitas de la Formación Méndez. Estas unidades se distribuyen ampliamente en los flancos del anticlinal de Huayacocotla, en el sector noroccidental de la entidad

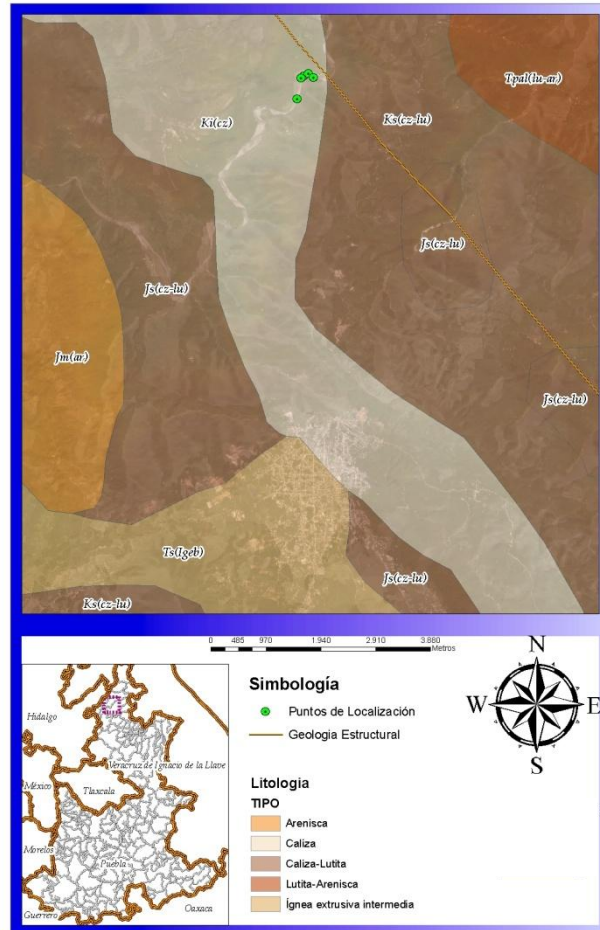


Figura 2.4. Geología en el municipio de Xicotepéc de Juárez, estado de Puebla de los Ángeles.

2.9 Hidrología

Las propiedades físicas de la roca que influyen en el movimiento del agua subterránea son la porosidad, permeabilidad, a continuación se describe brevemente.

2.9.1 Porosidad

Se refiere a la cantidad de espacios vacíos dentro de la masa rocosa; la arcilla y la arena son porosas, igualmente una arenisca mal cementada o una roca fracturada con planos de disolución, porque hay volumen de espacios vacíos en el seno de la roca. La porosidad varía con la dimensión de los huecos y el grado de cohesión de los minerales que lo limitan.

Los poros pueden constituir del 1 al 45% del volumen total de una roca y se mide por la relación existente entre el volumen ocupado por los poros y el volumen total del cuerpo de la roca. La porosidad no depende del tamaño de los granos si estos son uniformes, pero sí de la manera en como estén arreglados o empaquetados y de la variedad de tamaño de los granos o sección.

Existen dos tipos de porosidad: porosidad primaria, la cual alude a los espacios existentes entre las partículas del material, es decir, los espacios entre los granos; y la porosidad secundaria la cual alude a los espacios desarrollados por fracturamiento o por la presencia de planos de disolución dentro del material.

2.9.2 Permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad que tiene un material de permitir que se establezca el flujo de aguas subterráneas. Ello dependerá de la porosidad y de la conexión entre las aberturas e intersticios, y del tamaño y forma de tales conductos. En otras palabras, la permeabilidad no solo depende de la porosidad de la roca sino también del tamaño de los poros

2.9.3 Tipo de acuífero

El acuífero que se encuentra en la zona de estudio es de tipo fracturado, es decir, el agua se almacena entre las fracturas o diaclasas, las cuales están intercomunicadas entre sí, por lo tanto los flujos internos de agua se comportan de manera heterogénea por direcciones preferenciales.

Este acuífero se desarrolló por la extensa deformación existente en las rocas del área de interés.

Estos acuíferos se caracterizan por tener una buena permeabilidad y porosidad dando como resultado que el flujo de agua subterránea sea elevado ya que el agua viaja entre las fracturas, y en algunos casos, hay eventos de recarga esporádica.

3.0 Objetivos

Para el estudio hidrogeológico, se plantearon los siguientes objetivos.

- **Perforación de 5 pozos de monitoreo**
- **Elaboración de pruebas de permeabilidad**
- **Establecer la dirección de flujo de agua subterránea.**
- **Determinar la velocidad de flujo de agua subterránea.**
- **Muestreo de agua subterránea y del río**
- **Análisis de la calidad del agua subterránea y del río**

4.0 Metodología

4.1 Ubicación y perforación de los sondeos.

Para poder cumplir los objetivos antes descritos, el primer paso fue ubicar los 5 puntos en donde se realizaron los sondeos. Estos puntos se decidieron situar en la margen derecha del río (Figura 4.1). Lo anterior se definió con el fin de que el estudio hidrogeológico se enfocara en la zona aledaña a la obra, la cual se encuentra en la margen derecha del río del mismo nombre. El área total de que es objeto este estudio es 472 m².



Figura 4.1 Localización de los sondeos y manantiales en el río

Una vez definidos los puntos se procedió a realizar la perforación exploratoria de los 5 sondeos, la cual fue 3.5” de diámetro. Una vez terminada, se procedió equipar cada uno de los 5 sondeos con tubería de PVC de 2”, un filtro de grava de 3/16 a ¼ de diámetro, con el fin de que este filtro impida el paso de partículas dentro del sondeo. Seguido de esto se procedió a colocar un sello de bentonita y finalmente se colocó un sello sanitario de cemento, así como el registro para que el sondeo quedara totalmente protegido. En el anexo 1 se muestra el diseño final de cada uno de los sondeos.

Durante el proceso de la perforación exploratoria, se analizó el material de recorte producto de las obras de perforación. Este material sirvió para poder identificar sobre qué tipo de material se está perforando y a si poder realizar el corte litológico de cada uno de los sondeos los cuales se muestran en el anexo 2.

La profundidad de los sondeos varía ya que se buscó estudiar el comportamiento del agua subterránea a diferentes profundidades dentro del mismo tipo de roca.

4.2 Mediciones piezométricas

Para saber la profundidad del agua subterránea, se utilizó una sonda tipo Solinst gradada con una cinta de 100 metros de largo. Esta funciona introduciendo, un sensor dentro del sondeo, cuando el sensor toca el nivel del agua, esta emite una alarma. A estas lecturas se les resta la elevación del terreno para que el nivel del agua quedara en msnm. A partir de estos valores se generó la red de flujo de agua subterránea y a saber la dirección de flujo de la misma, (Foto 4.1).



Foto 4.1. Se muestra como se toman las lecturas con la sonda tipo Solinst

4.3 Desarrollo de los sondeos

Una vez que se tomaron las mediciones piezométricas de los 5 sondeos, se procedió a desarrollar cada uno de ellos. El desarrollo tiene como función la de limpiar el sondeo, es decir sacar todos los fluidos que se le inyectaron al momento de la perforación (bentonita), así como la de reparar el daño que se le causó a la formación durante la perforación, reacomodando las partículas dentro y cerca al área de la perforación. Además la de reacomodar las partículas del filtro de grava. El desarrollo tiene como fin, que la formación recupere sus condiciones hidráulicas naturales.

En este estudio se utilizaron dos metodologías para desarrollar los sondeos:

- bailling utilizado para desarrollar los sondeos 1, 2 y 3.
- sobre bombeo utilizado en los sondeos 4 y 5.

El bailling consiste en la evacuación del agua subterránea del sondeo por medio de un bailer el cual es un tubo de polietileno que tiene la capacidad de almacenar 1 litro de agua.

Para saber la cantidad mínima de agua se debe extraer del sondeo se utiliza la siguiente fórmula:

$$V = \frac{2}{3} (\pi r^2 h) \quad (4.1)$$

Donde:

V= Volumen de agua del sondeo

r^2 = Radio de la tubería

h= Altura de la columna de agua dentro del sondeo

Π = 3.1416

El sobre bombeo consiste en introducir una bomba dentro del sondeo y comenzar a sacar agua por un intervalo de tiempo considerable, o hasta que comience a salir agua limpia del sondeo. El caudal de extracción para esta prueba en los sondeos 4 y 5 fue de 0.5 Lps

4.4 Muestreo de agua subterránea y superficial

El muestreo de agua subterránea y muestro de agua del río (aguas arriba y aguas abajo), se realizo con el fin de saber los tipos de agua subterránea existentes en la zona. Los sondeos muestreados fueron el 1, 2, 4 y 5. Estas muestras se analizaron para (Ca, Mg, Na y K) así como para saber su alcalinidad.

Para realizar el muestreo en los sondeos se utilizo una bomba peristáltica marca MasterFlex de bajo flujo, a la cual se le coloco una manguera de 0.51mm de espesor. Esta manguera se introdujo en el sondeo y se comenzó a bombear agua por un periodo de 20 minutos antes de tomar la muestra (Foto 4.2).

En cada sondeo se tomaron 3 muestras; dos envases de polipropileno de 250 ml para hacer el análisis de (Ca, Mg, Na y k) a los cuales se les añadieron 10 gotas de HNO₃ (ácido nítrico) como conservador y un envase de polipropileno de 1 litro para hacer un análisis de alcalinidad.

Las muestras fueron etiquetadas con material resistente al agua y tinta indeleble e inmediatamente se colocaron en una hielera para mantener las muestras a 4°C, para retardar la acción de los microorganismos (Foto 4.3).

Para el muestreo del agua del río únicamente se introdujeron las botellas dentro del cauce del río hasta que se llenara, teniendo cuidado de que en las botellas no quedara aire.



Foto 4.2. Muestra el procedimiento para tomar la muestra de agua subterránea en los sondeos



Foto 4.3. Envases de polipropileno de 1 litro después de haber tomado la muestra de agua subterránea en los sondeos

4.5 Prueba Slug

La prueba slug, se realizó para calcular la permeabilidad y la velocidad del flujo subterráneo.

La prueba slug esencialmente consiste en medir la recuperación de la carga hidráulica después de un cambio instantáneo de la misma. Estos cambios a través del tiempo pueden ser usados para estimar la conductividad hidráulica de la formación (Figura 4.2).

Durante la realización de esta prueba se inyecta agua, y se mide la recuperación de los niveles del agua durante intervalos de tiempo rápidos en el transcurso de los próximos minutos.

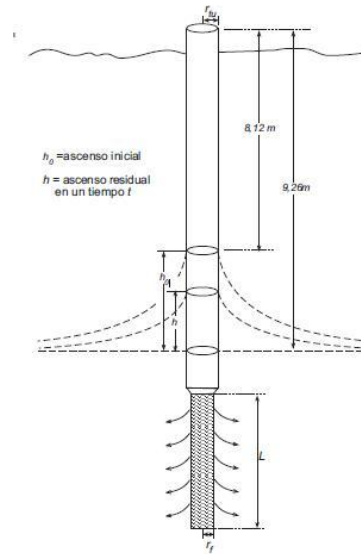


Imagen 4.2. Funcionamiento de una

Para tomar las lecturas de la recuperación de la carga hidráulica, se utilizó un transductor marca Global Water modelo WL16, el cual se programó para tomar lecturas cada 5 segundos. Este consta de un sensor con un diafragma de silicio el cual se introduce en el sondeo y un cable USB que se conecta a una laptop para registrar los datos (Fotos 4.4 y 4.5).



Foto 4.4 Izquierda, se aprecia el transductor marca Global Water, Foto 4.5 derecha adquisición de datos durante la prueba slug.

Los datos obtenidos son almacenados en una laptop para su posterior procesamiento.

El método para procesar los datos obtenidos en campo es el de Hvorslev (1951), en el cual se genera un ascenso inicial (h_0) y se miden los niveles en función del tiempo. La permeabilidad del terreno viene dada por la siguiente ecuación:

$$K = \frac{r_c^2 \ln \frac{1}{2\psi} + \left(1 + \left(\frac{1}{2\psi}\right)^2\right)^{1/2}}{2bt_0} \quad (4.2)$$

Donde:

K= Permeabilidad

r_c = Radio de entubación

b= Longitud de la tubería ranurada

$$\Psi = \frac{\sqrt{Kz/Kr}}{b/rc}$$

Kz = Componente vertical de la conductividad hidráulica

t_0 = Tiempo en el que aún perdura el ascenso instantáneo inicial

Si existe un filtro de grava (en formaciones de baja permeabilidad) se debe considerar el radio del empaque de grava como radio de la zona filtrante, ya que esa es la pared del cilindro que debe atravesar el agua para pasar a la formación geológica (el radio del filtro de grava será el radio de la perforación).

Una vez obtenida la permeabilidad, se procedió a calcular la velocidad lineal de flujo de agua subterránea. Para ello se utilizó la siguiente ecuación:

$$Vr = K \frac{\frac{\Delta y}{\Delta x}}{\mu e} \quad (4.3)$$

Donde:

Vr = Velocidad real del flujo subterráneo

K= Conductividad hidráulica (permeabilidad)

$\Delta y/\Delta x$ = Gradiente hidráulico

μe = Porosidad eficaz

En donde el gradiente hidráulico está dado por la siguiente ecuación

$$i = \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (4.4)$$

Donde:

i= Gradiente hidráulico

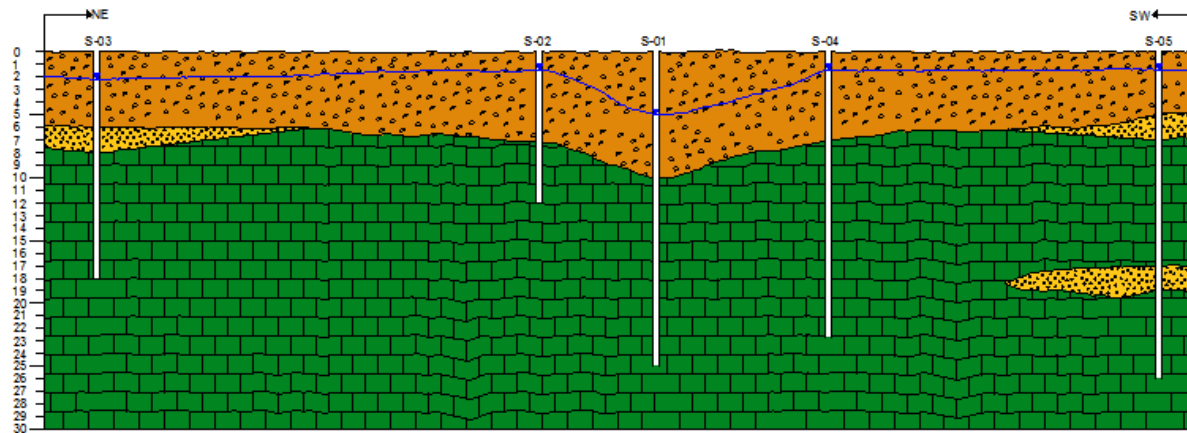
h_1, h_2 = Carga hidráulica

L= Distancia existente entre las cargas hidráulicas

5.0 Resultados

5.1 Construcción de la sección hidrogeológica

Para la construcción de la sección hidrogeológica, se analizaron las muestras de canal a cada metro en la que se profundizaba la perforación de los sondeos con el fin de obtener la mayor cantidad de datos y poder elaborar una sección hidrogeológica más representativa de la región, (figura 5.1). En esta figura se observa que los 5 sondeos pasaron por una capa de material de relleno de entre 7 y 10 m de espesor. Este material es producto de las obras que se realizan en el río pasando esta capa se encontró roca fracturada (caliza).



SIMBOLOGÍA






-  Material de relleno, constituido principalmente por arenas en una matriz arcillosa de color pardo, presenta cantos de tamaño de 3.0 cm a 1.0 cm y gravas gruesas, estos materiales están formados por caliza de color gris oscuro y gris claro, en algunas muestras se puede apreciar fracturas rellenas de caliza
-  Arenas finas depositadas por el río San Marcos
-  Caliza, caliza con bandas de pedernal, caliza mbrítica, provenientes de las Formación Miahuatepec, Formación Ortizaba y Formación Tamauilipas
-  Sondeo
-  Nivel Estático

Figura 5.1. Sección hidrogeológica

5.2 Elaboración de la red de flujo de agua subterránea

La red de flujo de agua subterránea se realizó tomando las mediciones piezométricas en cada uno de los sondeos (Tabla 5.1). Estas lecturas se tomaron con la sonda tipo Solinst.

Tabla 5.1 Elevación del nivel estático de los sondeos y manantiales localizados en la zona de estudio

Sondeo	N.E [m]	Elevación del N.E. [m]
Sondeo 1	5.01	200.19
Sondeo 2	1.51	200.82
Sondeo 3	2.08	203.55
Sondeo 4	1.45	200.13
Sondeo 5	1.52	199.62
Manantial 1	0	199.29
Manantial 2	0	198.35
Manantial 3	0	199.92

En la red de flujo (Figura 5.2) se observa que en la zona donde se encuentran ubicado el sondeo 1 la línea equipotencial sufre una pequeña deformación, la cual nos indica un flujo elevado de agua subterránea.

El agua subterránea fluye en dirección NW-S con los siguientes gradientes hidráulicos calculados para cada sondeo (Tabla 5.2)

Tabla 5.2 Gradientes hidráulicos calculados para los 5 sondeos

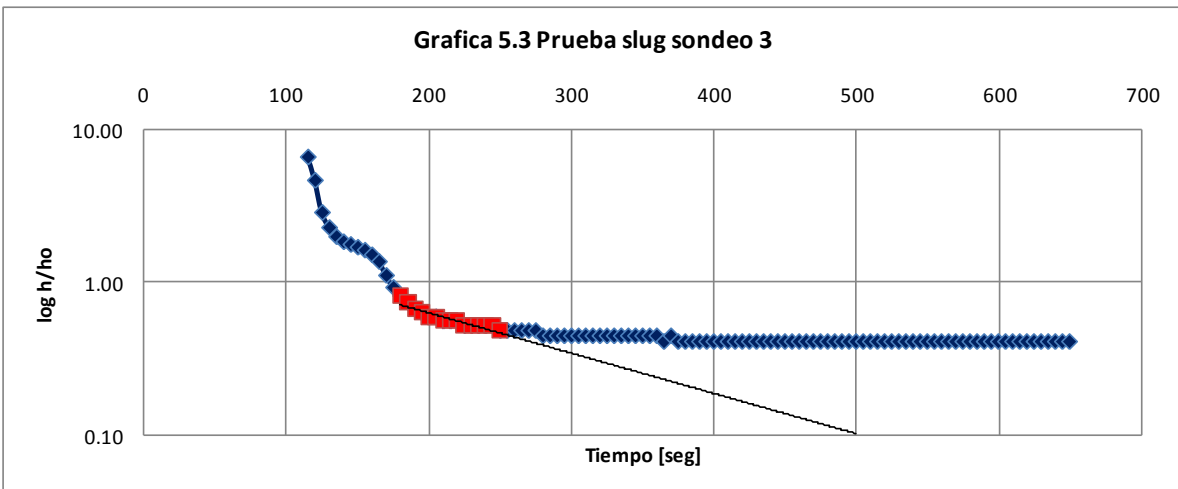
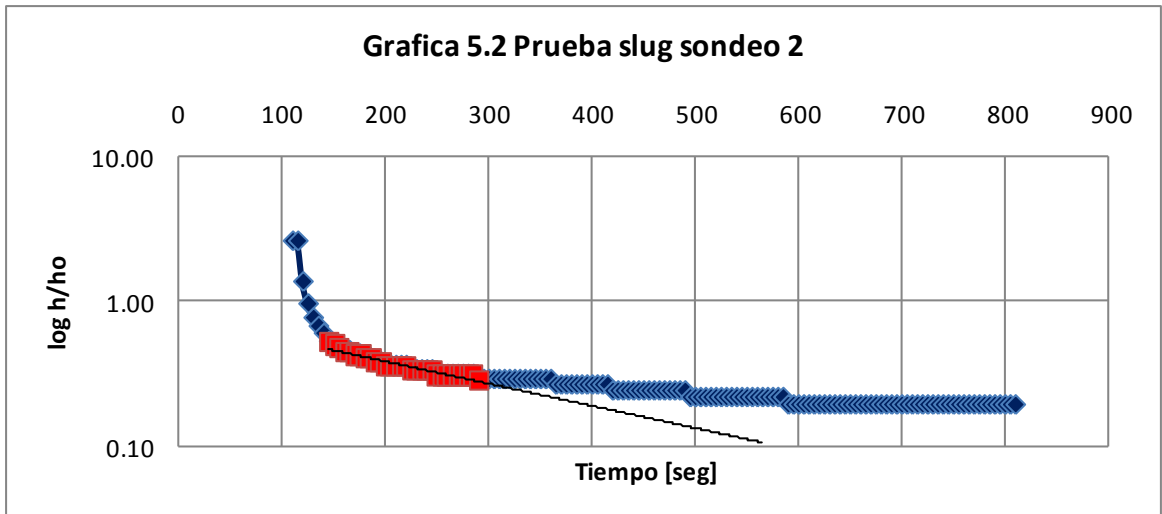
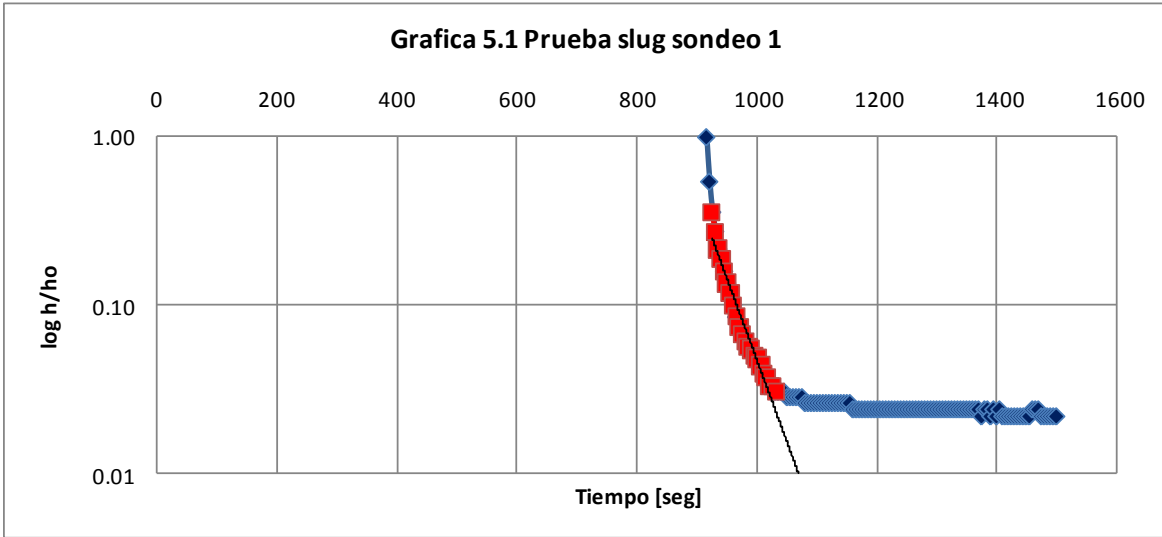
sondeo	i
Sondeo 1	0.52
Sondeo 2	0.45
Sondeo 3	0.52
Sondeo 4	0.14
Sondeo 5	0.40



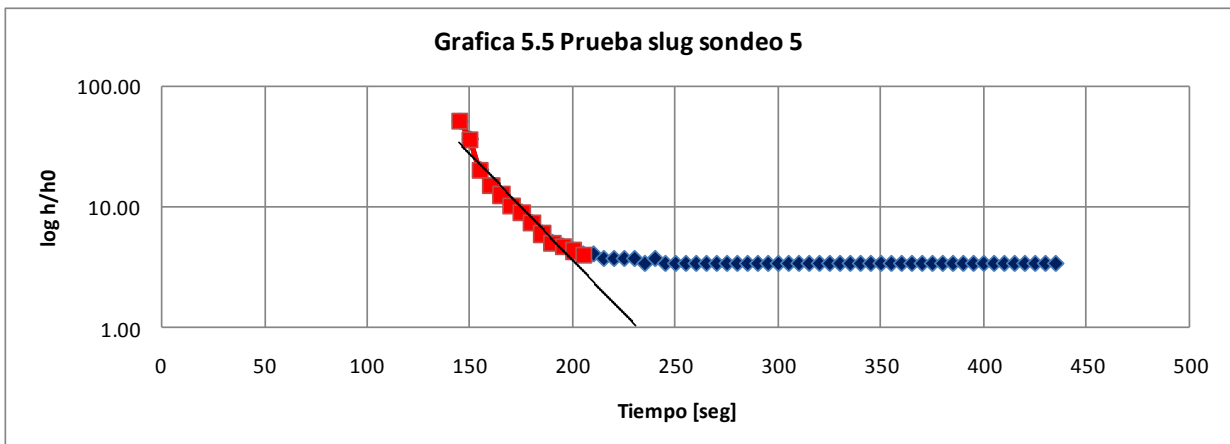
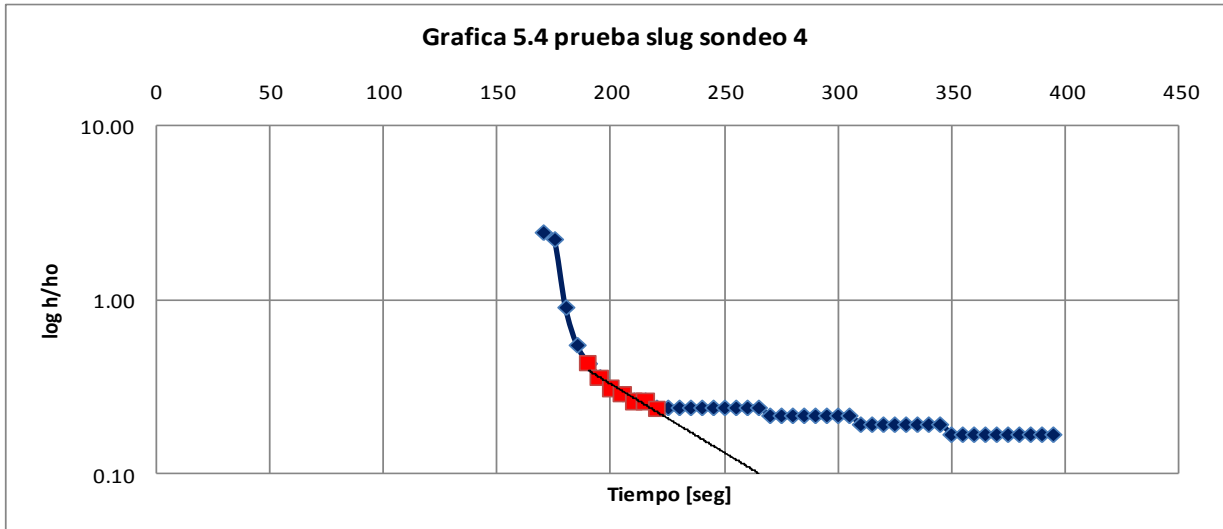
Figura 5.2 Red de flujo de río

5.3 Determinación de la Permeabilidad y Velocidad del Flujo Subterráneo mediante pruebas Slug

Durante las pruebas Slug se inyectó una cantidad de 4 lps de agua adentro de los sondeos; estos valores se registraron y posteriormente se graficaron para obtener los valores de permeabilidad y velocidad de flujo subterránea, que se muestran a continuación.



Graficas 5.1, 5.2, 5.3 Graficas obtenidas de los datos obtenidos durante la prueba slug



Graficas 5.4, 5.5 Graficas obtenidas de los datos obtenidos durante la prueba slug

Una vez que se tienen las graficas se hace puede obtener el valor de T_0 la cual se obtiene realizando una línea de tendencia de las graficas hasta que se interseca al eje de las x. Seguido se procede a utilizar la ecuación 4.4 de este trabajo para calcular la permeabilidad. Obtenido este dato se procede a utilizar la ecuación 4.3 para poder determinar la velocidad de flujo subterráneo (Figura 5.3).

5.3.1 Sondeo 1

5.3.1.1 Permeabilidad

$$K = \frac{(0.0254)^2 [m] \ln \frac{1}{2(0.0011)} + \left(1 + \left(\frac{1}{2(0.0011)}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}}{2(23[m])(160 [s])} = 5.97e^{-7} \left[\frac{m}{s}\right]$$

$$K = 7.68e^{-3} \left[\frac{m}{d} \right]$$

5.3.1.2. Velocidad de flujo subterráneo

$$Vr = \frac{7.68e^{-3} \left[\frac{m}{d} \right] * (0.52)}{0.1} = 3.99 \left[\frac{m}{d} \right]$$

5.3.2. Sondeo 2

5.3.2.1 Permeabilidad

$$K = \frac{(0.0254)^2 \left[\frac{m}{s} \right] \ln \frac{1}{2(0.0025)} + \left(1 + \left(\frac{1}{2(0.0025)} \right)^2 \right)^{1/2}}{2(10[m])(560)} = 3.44e^{-7} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$K = 2.97e^{-2} \left[\frac{m}{d} \right]$$

5.3.2.2 Velocidad de flujo subterráneo

$$Vr = \frac{2.97 \left[\frac{m}{d} \right] * (0.52)}{0.1} = 1.34e^{-1} \left[\frac{m}{d} \right]$$

5.3.3 Sondeo 3

5.3.3.1 Permeabilidad

$$K = \frac{(0.0254)^2 [m] \ln \frac{1}{2(0.0015)} + \left(1 + \left(\frac{1}{2(0.0015)} \right)^2 \right)^{1/2}}{2(16.3[m])(500)} = 2.28e^{-7} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$K = 1.97e^{-2} \left[\frac{m}{d} \right]$$

5.3.3.2. Velocidad de flujo subterráneo

$$Vr = \frac{1.97 \left[\frac{m}{d} \right] * (0.52)}{0.1} = 1.03e^{-1} \left[\frac{m}{d} \right]$$

5.3.4 Sondeo 4

5.3.4.1 Permeabilidad

$$K = \frac{(0.0254)^2 [m] \ln \frac{1}{2(0.0012)} + \left(1 + \left(\frac{1}{2(0.0012)}\right)^2\right)^{1/2}}{2(21.2[m])(263)} = 1.83e^{-7} \left[\frac{m}{s}\right]$$

$$K = 1.58e^{-2} \left[\frac{m}{d}\right]$$

5.3.4.2. Velocidad de flujo subterráneo

$$Vr = \frac{1.58 \left[\frac{m}{d}\right] * (0.52)}{0.1} = 2.21e^{-2} \left[\frac{m}{d}\right]$$

5.3.5 Sondeo 5

5.3.5.1 Permeabilidad

$$K = \frac{(0.0254)^2 [m] \ln \frac{1}{2(0.0010)} + \left(1 + \left(\frac{1}{2(0.0010)}\right)^2\right)^{1/2}}{2(25[m])(230)} = 1.59e^{-7} \left[\frac{m}{s}\right]$$

$$K = 1.37e^{-2} \left[\frac{m}{d}\right]$$

5.3.4.2. Velocidad de flujo subterráneo

$$Vr = \frac{1.37 \left[\frac{m}{sd}\right] * (0.52)}{0.1} = 5.49e^{-2} \left[\frac{m}{d}\right]$$

Tabla 5.3 Resultados de permeabilidad y velocidad del flujo subterráneo calculados por el método de Hvorslev.

Sondeo	Permeabilidad [m/d]	Velocidad [m/d]
S-01	1.30e ⁻²	6.77e ⁻²
S-02	2.97e ⁻²	1.34e ⁻¹
S-03	1.97e ⁻²	1.03e ⁻¹
S-04	1.58e ⁻²	2.21e ⁻²
S-05	1.37e ⁻²	5.49e ⁻²

(Dunn and Leopold, 1978; Freeze and Cherry, 1979), mencionan que los valores de permeabilidad en rocas fracturadas van en un rango de 10^2 a 10^{-3} lo cual nos verifica que el agua subterránea fluye en un medio fracturado.

El valor de la velocidad de flujo subterráneo promedio en la zona es de $7.62e^{-2}$ m/d.



Figura 5.3 Velocidad de flujo subterráneo del río

6.0 Conclusiones

El análisis hidrogeológico realizado, nos dio como resultado la permeabilidad y la velocidad del flujo subterráneo.

La permeabilidad calculada por el procesamiento de los datos obtenidos durante la prueba Slug nos muestra que en el sondeo 1, la permeabilidad presenta un valor 7.03 m/s por lo tanto es muy elevada, la posible causa de esto es que en la zona donde se encuentra ubicado este sondeo, el terreno fue sumamente alterado por las obras de construcción, mientras que en los sondeos 2, 3, 4 y 5 la permeabilidad presenta valores que van de 2.12 m/s a 3.09 m/s, los cuales estos valores son representativos de las rocas fracturadas (Dunn and Leopold, 1978; Freeze and Cherry, 1979).

En cuanto a la velocidad de flujo subterráneo los sondeos 2 Y 5 presentan velocidades similares de 9.55 m/s y 8.71 m/s respectivamente, esto debido a que en esa zona, el terreno no se encuentra demasiado alterado, mientras que en el sector en donde se localiza el sondeo 1 la velocidad de flujo de agua subterránea se incrementa notoriamente a 36.66 m/s, la posible causa es que este sector es el más afectado por las obras de construcción ya que por la excavación que se realizo para hacer la cimentación ocasionó que la roca se alterara incrementando el grado de fracturamiento de la misma por lo tanto origino que la roca se volviera más permeable y condujera con más facilidad el flujo de agua subterránea en este sector. El sondeo 4 la velocidad es de considerable con respecto a los demás sondeos. Probablemente la velocidad de flujo de agua subterránea en el sondeo 1 era similar a la de los sondeos 2, y 5, pero esta fue alterada por las obras de cimentación.

7.0 Bibliografía

Applegate, S.P., 1992. A new genus and species of Picnodont, *Tepexichthys aranguthyorum* from the Cretaceous (albian) of Central Mexico, tepexo de Rodríguez, Puebla: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, UNAM. 10, 2, pp 164-178.

Ames J. Butler, Jr. The Design, Performance, and Analysis of Slug Test, Kansas Geological Survey, The University of Kansas, 1998.

CONAGUA.- Comisión Nacional del Agua. Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea Acuífero (3001) Poza Rica Estado de Veracruz, Diario Oficial de La Federación, agosto 2009.

Dunne, T. and Leopold, 1978. Water in Environmental Planning. W. H. Freeman and Company, San Francisco, CA, 818 p.

Freeze, R. A. and J. A. Cherry. 1979. Groundwater. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 604 p.

Fletcher G. Driscoll. Groundwater and wells, Johnson Filtration Systems Inc., St Paul, Minnesota, 1986.

Gobierno del Estado de Puebla, Secretaría de Gobernación, Los Municipios de Puebla, 1ª edición 1988.

Hvorslev, M. J., Time lag and soil permeability in ground.water observation, U.S. Army Corps of Engrs. Waterways Exper, Sta. Bull no. 36, 1951.

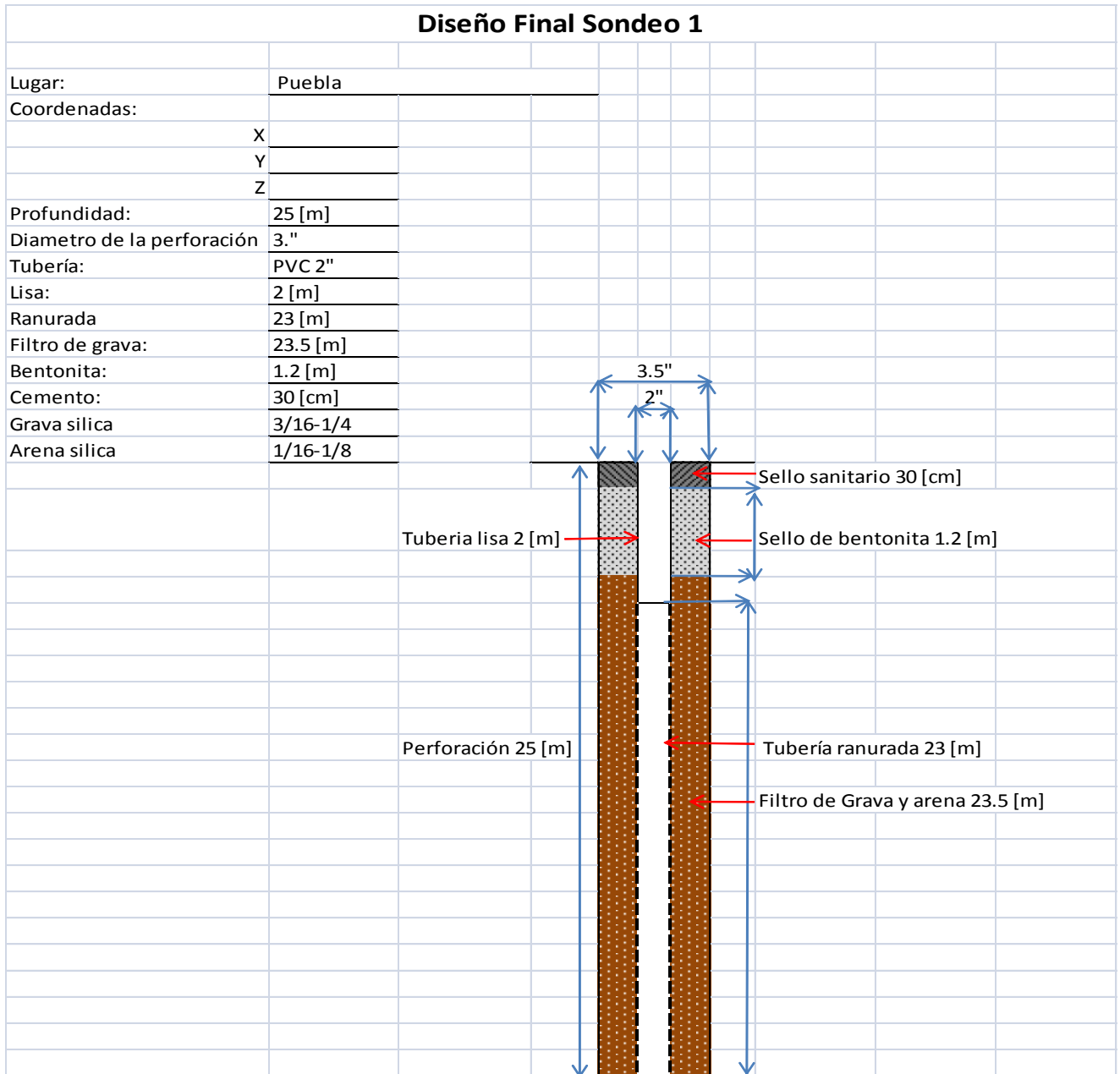
INEGI - Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Anuario Estadístico del Estado de Puebla 1996.

Ortega-Gutiérrez, Fernando, 1978, Estratigrafía del Complejo Acatlán en la Mixteca Baja, Estados de Puebla y Oaxaca: Universidad. Nacional. Autónoma. México, Instituto. Geología, Revista, v. 2, p. 112-131

Pantoja-Alor, J., 1992. Geología y paleoambientes de la Cantera Tlayúa, Tepexi de Rodríguez, estado de Puebla: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, UNAM, 9, 2, pp. 156-176.

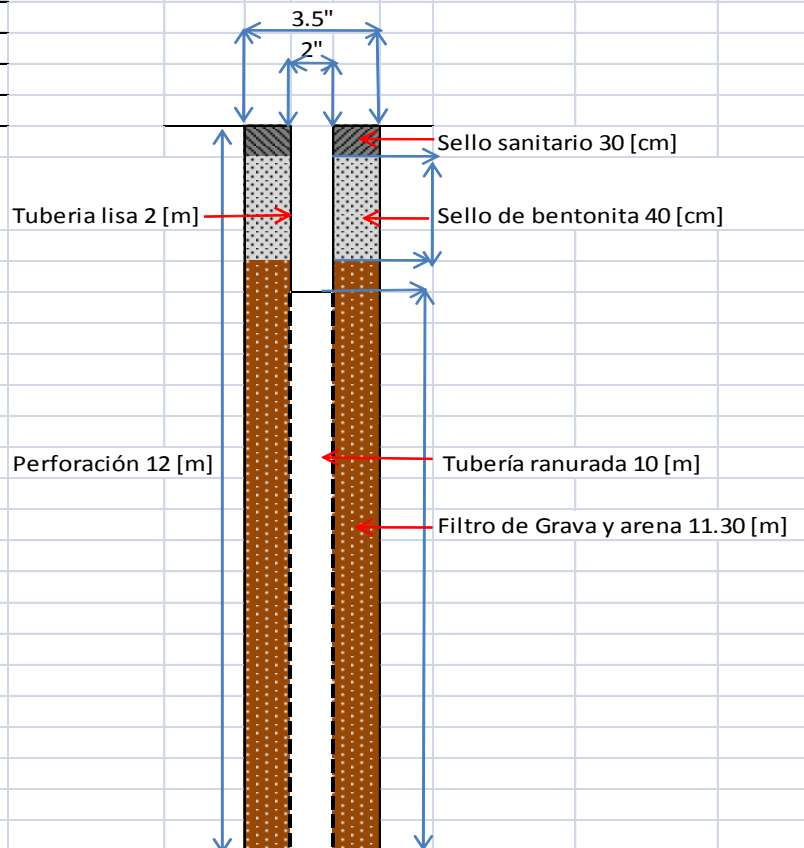
8.0 Anexos

Anexo 1. Diseño final de los sondeos



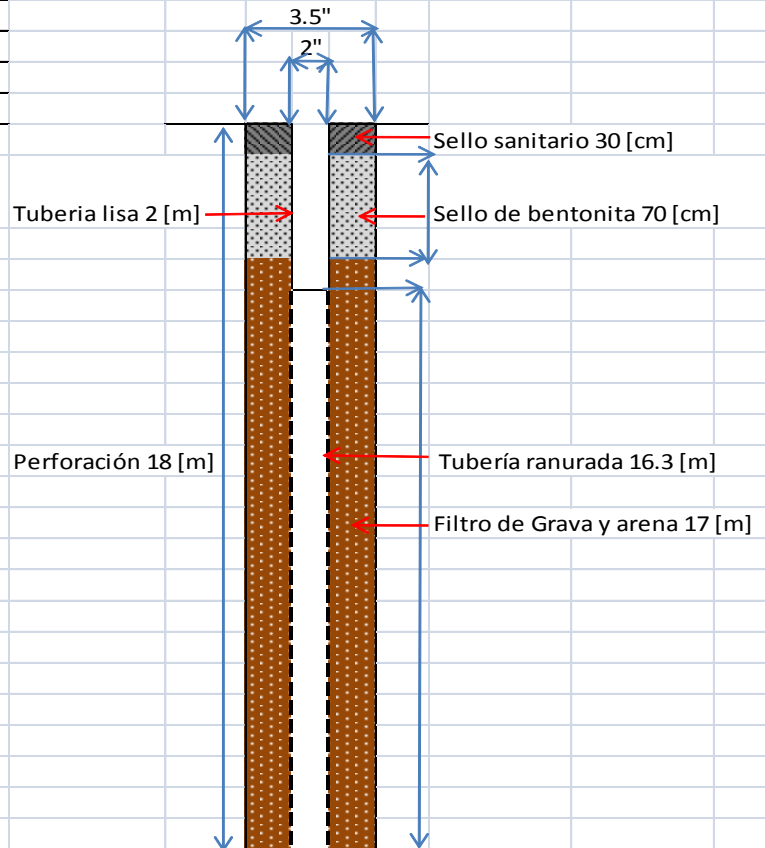
Diseño Final Sondeo 2

Lugar:	Puente San Marcos Puebla
Coordenadas:	
	X
	Y
	Z
Profundidad:	25 [m]
Diametro de la perforación	3.5"
Tubería:	PVC 2"
Lisa:	2 [m]
Ranurada	10 [m]
Filtro de grava:	11.30 [m]
Bentonita:	40 [cm]
Cemento:	30 [cm]
Grava silica	3/16-1/4
Arena silica	1/16-1/8



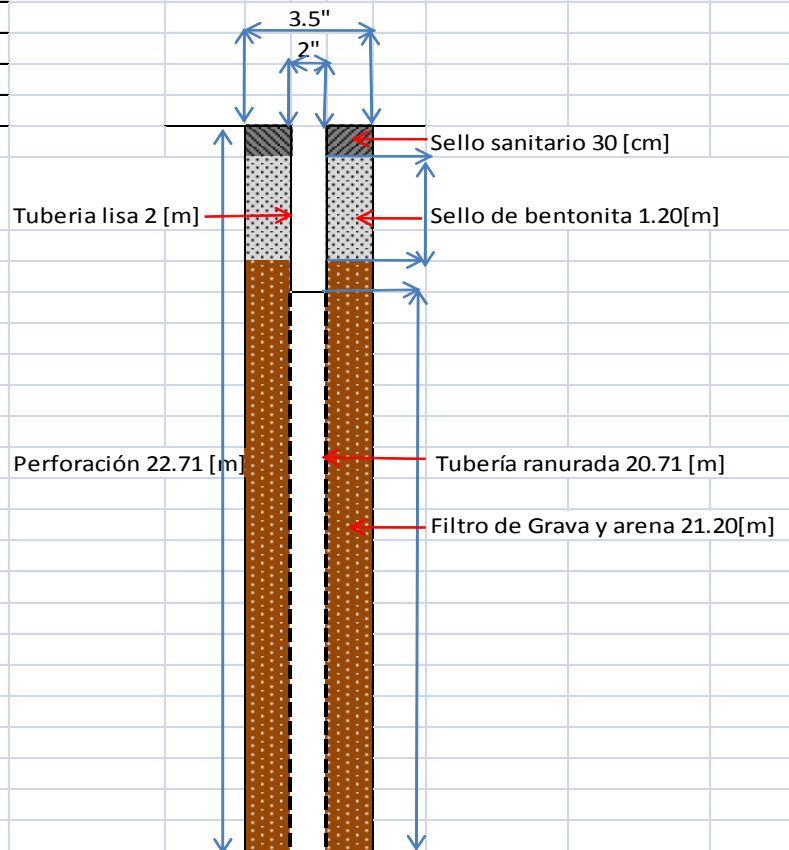
Diseño Final Sondeo 3

Lugar:	Puente San Marcos Puebla
Coordenadas:	
	X
	Y
	Z
Profundidad:	25 [m]
Diametro de la perforación	3.5"
Tubería:	PVC 2"
Lisa:	2 [m]
Ranurada	23 [m]
Filtro de grava:	23.5 [m]
Bentonita:	1.2 [m]
Cemento:	30 [cm]
Grava silica	3/16-1/4
Arena silica	1/16-1/8



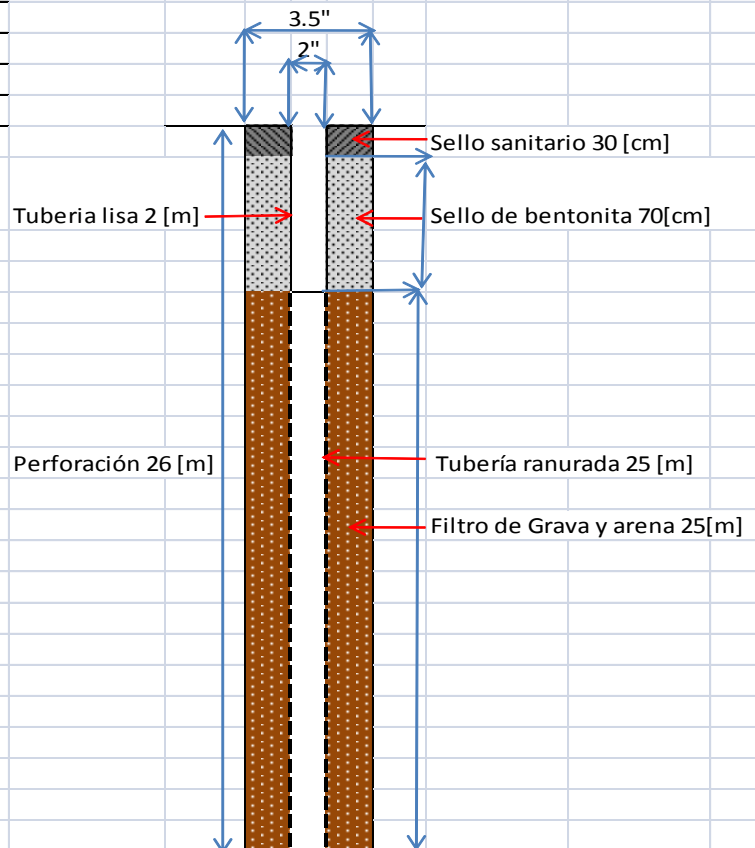
Diseño Final Sondeo 4

Lugar:	Puente San Marcos Puebla
Coordenadas:	
	X
	Y
	Z
Profundidad:	25 [m]
Diametro de la perforación	3.5"
Tubería:	PVC 2"
Lisa:	2 [m]
Ranurada	20.71 [m]
Filtro de grava:	21.20 [m]
Bentonita:	1.20[m]
Cemento:	30 [cm]
Grava silica	3/16-1/4
Arena silica	1/16-1/8



Diseño Final Sondeo 5

Lugar:	Puente San Marcos Puebla
Coordenadas:	
	X
	Y
	Z
Profundidad:	26 [m]
Diametro de la perforación	3.5"
Tubería:	PVC 2"
Lisa:	2 [m]
Ranurada	25 [m]
Filtro de grava:	25[m]
Bentonita:	70[cm]
Cemento:	30 [cm]
Grava silica	3/16-1/4
Arena silica	1/16-1/8



Anexo 2. Corte litológico de los sondeos

REGISTRO LITOLÓGICO SONDEO 1

Proyecto: _____

Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de muestra	Registro gráfico	Muestra	Clasificación de Suelo	Clasificación Visual	
					Descripción	Observaciones
0						
2.40-3.0						principalmente por arenas en una matriz arcillosa de color pardo, cantos de tamaño de 30 cm a 10 cm y gravas, todos estos materiales están formados por caliza de color gris oscuro y gris claro, algunas muestras presentan fracturas que están rellenas de calita
4.60-5.17						
5.20-5.42						
10						Caliza de color gris claro presenta fracturas rellenas de calita
25						

Tipo de perforadora: _____
 Ubicación: _____
 Coordenada UTM X: _____
 Coordenada UTM Y: _____

AGUA SUBTERRÁNEA

PROF.	FECHA	HORA

REGISTRO LITOLOGICO SONDEO 2

Proyecto: _____

Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de muestra	Registro gráfico	Muestra	Clasificación de Suelo	Clasificación Visual	
					NOIAS	CLASIFICACION VISUAL
0-0.30						
0.60-1.16						
1.20-1.50						
1.80-2.40						
2.40-2.65						
3-3.27						
3.6-4.20						
4.20-4.80						
4.80-4.95						
6.80-7.20						
7.50-7.80						
12						

Tipo de perforadora: _____
 Ubicación: _____
 Coordenada UTM X: _____
 Coordenada UTM Y: _____

Material obtenido principalmente por arenas en una matriz arcillosa de color pardo, cantos de tamaño de 30 cm a 10 cm y gravas, todos estos materiales estan formados por caliza de color gris oscuro y gris claro, algunas muestras presentan fracturas que estan rellenas de calita

Caliza de color gris claro presenta fracturas rellenas de calita

AGUA SUBTERRÁNEA

PROF.	FECHA	HORA

REGISTRO LITOLÓGICO SONDEO 3

Proyecto: _____

Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Clasificación de suelo	Tipo de perforadora: _____ Ubicación: _____ Coordenada UTM X: _____ Coordenada UTM Y: _____ Notas: _____ CLASIFICACION VISUAL Color gris oscuro y gris claro, algunas muestras presentan fracturas que están rellenas de calcita Arenas finas de color gris fuerte, depositadas por el río, este material se puede apreciar en la margen izquierda del río San Marcos Caliza de color gris claro, presenta fracturas rellenas de calcita
6 m						
8 m						
18.2						

AGUA SUBTERRÁNEA		
PROF.	FECHA	HORA

REGISTRO LITOLÓGICO SONDEO 4

Proyecto: _____

Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de muestra Código de la muestra	Registro gráfico	Muestra	Tipo de muestra	Clasificación de suelo	NOTAS	CLASIFICACION VISUAL
7 m						Ubicación: _____ Tipo de perforadora: _____ Descripción: _____ Observaciones: _____ Coordenadas: _____ Escala: 1:10 cm = 1 m Material: _____	
						color gris oscuro y gris claro, algunas muestras presentan fracturas que están rellenas de calcita	
22.71						Caliza de color gris claro presenta fracturas rellenas de calcita	

AGUA SUBTERRÁNEA

PROF.	FECHA	HORA

REGISTRO LITOLÓGICO SONDEO 5

Proyecto: _____

Página: 1 de 1

Profundidad en metros	Número de muestra	Registro gráfico	Muestra	Clasificación de Suelo	NOTAS
					Tipo de perforadora: _____ Ubicación: _____ Coordenada UTM: _____ CLASIFICACION VISUAL
6					Arcillas finas de color gris fuerte, depositadas por el río, este material se puede apreciar en la margen izquierda del río San Marcos
7					Caliza de color gris claro presenta fracturas rellenas de calcita
17					Arcillas finas y medias de color pardo claro en matriz arcillosa
19					Caliza de color gris claro presenta fracturas rellenas de calcita
26					

AGUA SUBTERRÁNEA

PROF.	FECHA	HORA

Anexo 3 Control de datos de las pruebas Slug

Control de datos de la prueba slug del sondeo 1

cota [m]	205.20
N.E [m]	5.01
Carga Hidráulica inicial	200.19
N.f [m]	0.43
Carga Hidráulica final	204.77
h _o [m]	4.58

Time [seg]	h [m]	h/ho
915	4.58	1.00
920	2.49	0.54
925	1.64	0.36
930	1.26	0.28
935	0.99	0.22
940	0.86	0.19
945	0.73	0.16
950	0.62	0.14
955	0.54	0.12
960	0.46	0.10
965	0.39	0.09
970	0.34	0.07
975	0.31	0.07
980	0.28	0.06
985	0.26	0.06
990	0.25	0.05
995	0.23	0.05
1000	0.22	0.05
1005	0.2	0.04
1010	0.18	0.04
1015	0.17	0.04
1020	0.15	0.03
1025	0.15	0.03
1030	0.14	0.03
1035	0.14	0.03
1040	0.14	0.03
1045	0.14	0.03
1050	0.13	0.03
1055	0.13	0.03
1060	0.13	0.03

Time [seg]	h [m]	h/ho
1065	0.13	0.03
1070	0.13	0.03
1075	0.13	0.03
1080	0.12	0.03
1085	0.12	0.03
1090	0.12	0.03
1095	0.12	0.03
1100	0.12	0.03
1105	0.12	0.03
1110	0.12	0.03
1115	0.12	0.03
1120	0.12	0.03
1125	0.12	0.03
1130	0.12	0.03
1135	0.12	0.03
1140	0.12	0.03
1145	0.12	0.03
1150	0.12	0.03
1155	0.12	0.03
1160	0.11	0.02
1165	0.11	0.02
1170	0.11	0.02
1175	0.11	0.02
1180	0.11	0.02
1185	0.11	0.02
1190	0.11	0.02
1195	0.11	0.02
1200	0.11	0.02
1205	0.11	0.02
1210	0.11	0.02
1215	0.11	0.02

Time [seg]	h [m]	h/ho
1220	0.11	0.02
1225	0.11	0.02
1230	0.11	0.02
1235	0.11	0.02
1240	0.11	0.02
1245	0.11	0.02
1250	0.11	0.02
1255	0.11	0.02
1260	0.11	0.02
1265	0.11	0.02
1270	0.11	0.02
1275	0.11	0.02
1280	0.11	0.02
1285	0.11	0.02
1290	0.11	0.02
1295	0.11	0.02
1300	0.11	0.02
1305	0.11	0.02
1310	0.11	0.02
1315	0.11	0.02
1320	0.11	0.02
1325	0.11	0.02
1330	0.11	0.02
1335	0.11	0.02
1340	0.11	0.02
1345	0.11	0.02
1350	0.11	0.02
1355	0.11	0.02
1360	0.11	0.02
1365	0.11	0.02
1370	0.11	0.02
1375	0.1	0.02
1380	0.11	0.02
1385	0.11	0.02
1390	0.1	0.02
1395	0.11	0.02
1400	0.1	0.02
1405	0.11	0.02
1410	0.1	0.02
1415	0.1	0.02
1420	0.1	0.02

Time [seg]	h [m]	h/ho
1425	0.1	0.02
1430	0.1	0.02
1435	0.1	0.02
1440	0.1	0.02
1445	0.1	0.02
1450	0.1	0.02
1455	0.1	0.02
1460	0.11	0.02
1465	0.11	0.02
1470	0.11	0.02
1475	0.1	0.02
1480	0.1	0.02
1485	0.1	0.02
1490	0.1	0.02
1495	0.1	0.02
1500	0.1	0.02

Control de datos de la prueba slug del sondeo 2

cota [m]	202.33
N.E [m]	1.51
Carga Hidráulica	200.82
N.f [m]	1.09
Carga Hidráulica final	201.24
ho	0.42

Time [seg]	h [m]	h/ho
110	1.09	2.60
115	1.09	2.60
120	0.57	1.36
125	0.4	0.95
130	0.32	0.76
135	0.28	0.67
140	0.25	0.60
145	0.22	0.52
150	0.21	0.50
155	0.2	0.48
160	0.19	0.45
165	0.19	0.45
170	0.18	0.43
175	0.18	0.43
180	0.17	0.40
185	0.17	0.40
190	0.16	0.38
195	0.16	0.38
200	0.15	0.36
205	0.15	0.36
210	0.15	0.36
215	0.15	0.36
220	0.15	0.36
225	0.14	0.33
230	0.14	0.33
235	0.14	0.33
240	0.14	0.33
245	0.14	0.33
250	0.13	0.31
255	0.13	0.31
260	0.13	0.31
265	0.13	0.31
270	0.13	0.31
275	0.13	0.31
280	0.13	0.31
285	0.13	0.31
290	0.12	0.29
295	0.12	0.29
300	0.12	0.29
305	0.12	0.29
310	0.12	0.29
315	0.12	0.29
320	0.12	0.29
325	0.12	0.29
330	0.12	0.29
335	0.12	0.29
340	0.12	0.29

Time [seg]	h [m]	h/ho
345	0.12	0.29
350	0.12	0.29
355	0.12	0.29
360	0.12	0.29
365	0.11	0.26
370	0.11	0.26
375	0.11	0.26
380	0.11	0.26
385	0.11	0.26
390	0.11	0.26
395	0.11	0.26
400	0.11	0.26
405	0.11	0.26
410	0.11	0.26
415	0.11	0.26
420	0.1	0.24
425	0.1	0.24
430	0.1	0.24
435	0.1	0.24
440	0.1	0.24
445	0.1	0.24
450	0.1	0.24
455	0.1	0.24
460	0.1	0.24
465	0.1	0.24
470	0.1	0.24
475	0.1	0.24
480	0.1	0.24
485	0.1	0.24
490	0.1	0.24
495	0.09	0.21
500	0.09	0.21
505	0.09	0.21
510	0.09	0.21
515	0.09	0.21
520	0.09	0.21
525	0.09	0.21
530	0.09	0.21
535	0.09	0.21
540	0.09	0.21
545	0.09	0.21
550	0.09	0.21
555	0.09	0.21
560	0.09	0.21
565	0.09	0.21
570	0.09	0.21

Time [seg]	h [m]	h/ho
575	0.09	0.21
580	0.09	0.21
585	0.09	0.21
590	0.08	0.19
595	0.08	0.19
600	0.08	0.19
605	0.08	0.19
610	0.08	0.19
615	0.08	0.19
620	0.08	0.19
625	0.08	0.19
630	0.08	0.19
635	0.08	0.19
640	0.08	0.19
645	0.08	0.19
650	0.08	0.19
655	0.08	0.19
660	0.08	0.19
665	0.08	0.19
670	0.08	0.19
675	0.08	0.19
680	0.08	0.19
685	0.08	0.19
690	0.08	0.19
695	0.08	0.19
700	0.08	0.19

Time [seg]	h [m]	h/ho
705	0.08	0.19
710	0.08	0.19
715	0.08	0.19
720	0.08	0.19
725	0.08	0.19
730	0.08	0.19
735	0.08	0.19
740	0.08	0.19
745	0.08	0.19
750	0.08	0.19
755	0.08	0.19
760	0.08	0.19
765	0.08	0.19
770	0.08	0.19
775	0.08	0.19
780	0.08	0.19
785	0.08	0.19
790	0.08	0.19
795	0.08	0.19
800	0.08	0.19
805	0.08	0.19
810	0.08	0.19

Control de datos de la prueba slug del sondeo 3

cota [m]	205.63
N.E [m]	2.08
Carga Hidráulica	203.55
N.f [m]	1.81
Carga Hidráulica final	203.82
$h_0=$	0.27

Time [seg]	h [m]	h/h0
115	1.81	6.70
120	1.27	4.70
125	0.78	2.89
130	0.62	2.30
135	0.54	2.00
140	0.5	1.85
145	0.48	1.78
150	0.46	1.70
155	0.44	1.63
160	0.41	1.52
165	0.37	1.37
170	0.3	1.11
175	0.25	0.93
180	0.22	0.81
185	0.2	0.74
190	0.18	0.67
195	0.17	0.63
200	0.16	0.59
205	0.16	0.59
210	0.15	0.56
215	0.15	0.56
220	0.15	0.56
225	0.14	0.52
230	0.14	0.52
235	0.14	0.52
240	0.14	0.52
245	0.14	0.52
250	0.13	0.48
255	0.13	0.48
260	0.13	0.48
265	0.13	0.48
270	0.13	0.48
275	0.13	0.48
280	0.12	0.44
285	0.12	0.44
290	0.12	0.44
295	0.12	0.44
300	0.12	0.44
305	0.12	0.44
310	0.12	0.44
315	0.12	0.44
320	0.12	0.44
325	0.12	0.44
330	0.12	0.44
335	0.12	0.44
340	0.12	0.44

Time [seg]	h [m]	h/h0
345	0.12	0.44
350	0.12	0.44
355	0.12	0.44
360	0.12	0.44
365	0.11	0.41
370	0.12	0.44
375	0.11	0.41
380	0.11	0.41
385	0.11	0.41
390	0.11	0.41
395	0.11	0.41
400	0.11	0.41
405	0.11	0.41
410	0.11	0.41
415	0.11	0.41
420	0.11	0.41
425	0.11	0.41
430	0.11	0.41
435	0.11	0.41
440	0.11	0.41
445	0.11	0.41
450	0.11	0.41
455	0.11	0.41
460	0.11	0.41
465	0.11	0.41
470	0.11	0.41
475	0.11	0.41
480	0.11	0.41
485	0.11	0.41
490	0.11	0.41
495	0.11	0.41
500	0.11	0.41
505	0.11	0.41
510	0.11	0.41
515	0.11	0.41
520	0.11	0.41
525	0.11	0.41
530	0.11	0.41
535	0.11	0.41
540	0.11	0.41
545	0.11	0.41
550	0.11	0.41
555	0.11	0.41
560	0.11	0.41
565	0.11	0.41
570	0.11	0.41

Time [seg]	h [m]	h/h0
575	0.11	0.41
580	0.11	0.41
585	0.11	0.41
590	0.11	0.41
595	0.11	0.41
600	0.11	0.41
605	0.11	0.41
610	0.11	0.41
615	0.11	0.41
620	0.11	0.41
625	0.11	0.41
630	0.11	0.41
635	0.11	0.41
640	0.11	0.41
645	0.11	0.41
650	0.11	0.41

Control de datos de la prueba slug del sondeo 4

cota [m]	201.58
N.E [m]	1.45
Carga Hidráulica	200.13
N.f [m]	1.03
Carga Hidráulica final	200.55
$h_0=$	0.42

Time [seg]	h [m]	h/h ₀ [m]
170	1.03	2.45
175	0.94	2.24
180	0.38	0.90
185	0.23	0.55
190	0.18	0.43
195	0.15	0.36
200	0.13	0.31
205	0.12	0.29
210	0.11	0.26
215	0.11	0.26
220	0.1	0.24
225	0.1	0.24
230	0.1	0.24
235	0.1	0.24
240	0.1	0.24
245	0.1	0.24
250	0.1	0.24
255	0.1	0.24
260	0.1	0.24
265	0.1	0.24
270	0.09	0.21
275	0.09	0.21
280	0.09	0.21
285	0.09	0.21
290	0.09	0.21
295	0.09	0.21
300	0.09	0.21
305	0.09	0.21
310	0.08	0.19
315	0.08	0.19
320	0.08	0.19
325	0.08	0.19
330	0.08	0.19
335	0.08	0.19
340	0.08	0.19
345	0.08	0.19
350	0.07	0.17
355	0.07	0.17
360	0.07	0.17
365	0.07	0.17
370	0.07	0.17
375	0.07	0.17
380	0.07	0.17
385	0.07	0.17
390	0.07	0.17
395	0.07	0.17

Control de datos de la prueba slug del sondeo 5

cota [m]	201.13
N.E [m]	1.52
Carga Hidráulica	199.61
N.f [m]	1.55
Carga Hidráulica final	199.58
$h_0=$	0.03

Time [seg]	h [m]	h/h ₀ [m]
145	1.55	51.67
150	1.1	36.67
155	0.61	20.33
160	0.45	15.00
165	0.38	12.67
170	0.31	10.33
175	0.27	9.00
180	0.22	7.33
185	0.18	6.00
190	0.15	5.00
195	0.14	4.67
200	0.13	4.33
205	0.12	4.00
210	0.12	4.00
215	0.11	3.67
220	0.11	3.67
225	0.11	3.67
230	0.11	3.67
235	0.1	3.33
240	0.11	3.67
245	0.1	3.33
250	0.1	3.33
255	0.1	3.33
260	0.1	3.33
265	0.1	3.33
270	0.1	3.33
275	0.1	3.33
280	0.1	3.33
285	0.1	3.33
290	0.1	3.33

Time [seg]	h [m]	h/h ₀ [m]
295	0.1	3.33
300	0.1	3.33
305	0.1	3.33
310	0.1	3.33
315	0.1	3.33
320	0.1	3.33
325	0.1	3.33
330	0.1	3.33
335	0.1	3.33
340	0.1	3.33
345	0.1	3.33
350	0.1	3.33
355	0.1	3.33
360	0.1	3.33
365	0.1	3.33
370	0.1	3.33
375	0.1	3.33
380	0.1	3.33
385	0.1	3.33
390	0.1	3.33
395	0.1	3.33
400	0.1	3.33
405	0.1	3.33
410	0.1	3.33
415	0.1	3.33
420	0.1	3.33
425	0.1	3.33
430	0.1	3.33
435	0.1	3.33

Anexo 4 Anexo fotográfico



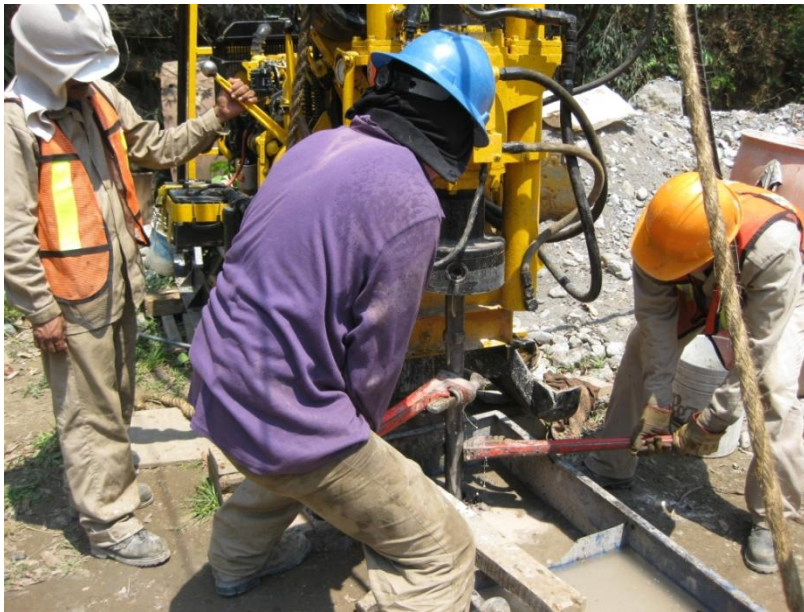
Perforación del sondeo 1



Entubamiento del sondeo 1



Sondeo 1 terminado



Perforación del sondeo 2



Colocación del filtro de grava del sondeo 2



Sondeo 2 terminado



Perforación del sondeo 3



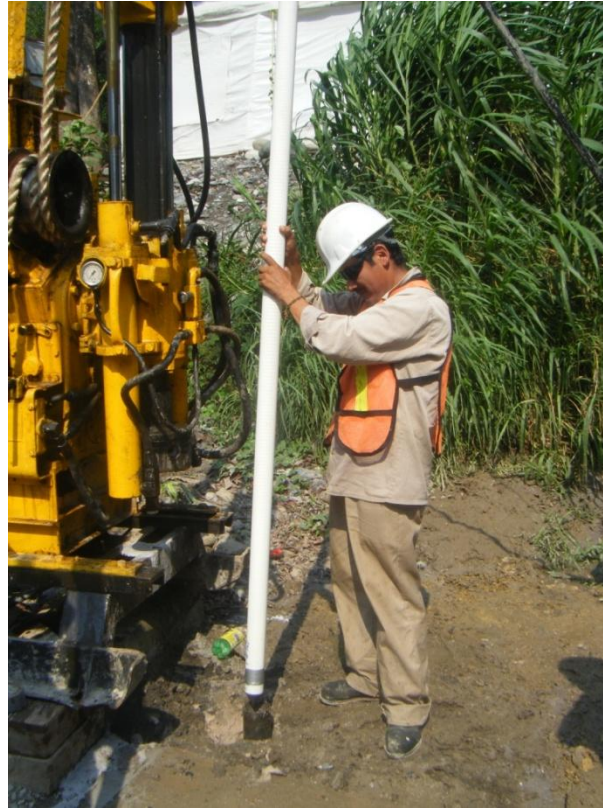
Entubamiento del sondeo 3



Sondeo 3 Terminado



Perforación del sondeo 4



Entubamiento del sondeo 4



Sondeo 4 terminado



Perforación sondeo 5



Entubamiento del sondeo 5



Sondeo 5 Terminado



Muestreo de agua subterránea en el sondeo 1



Muestreo de agua en manantial



Toma de datos durante la prueba slug