

UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

Trabajo de Grado

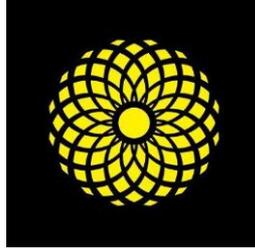
**ANÁLISIS DEL MANEJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS
EN PROYECTOS DE OBRA CIVIL – ZONA BARRIO
YCUÁ SATÍ, ASUNCIÓN-PARAGUAY**

MIRIAN CELESTE ALMADA DOMINGUEZ

Trabajo de Grado presentado a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Asunción, como requisito para la obtención del Título de Grado de Licenciatura en Ciencias-Mención Geología.

SAN LORENZO – PARAGUAY

Agosto – 2021



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

Trabajo de Grado

**ANÁLISIS DEL MANEJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS
EN PROYECTOS DE OBRA CIVIL – ZONA BARRIO
YCUÁ SATÍ, ASUNCIÓN-PARAGUAY**

MIRIAN CELESTE ALMADA DOMINGUEZ

Orientadora: **Prof. Dra. ANA MARÍA CASTILLO CLERICI**
Co-Orientador: **Ing. Civ. RICHARD ARIEL ROLON GUILLÉN**

Trabajo de Grado presentado a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Asunción, como requisito para la obtención del Título de Grado de Licenciatura en Ciencias-Mención Geología.

SAN LORENZO – PARAGUAY

Agosto – 2021

**ANÁLISIS DEL MANEJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN
PROYECTOS DE OBRA CIVIL – ZONA BARRIO YCUÁ SATÍ,
ASUNCIÓN-PARAGUAY.**

Autora: MIRIAN CELESTE ALMADA DOMINGUEZ.
Orientadora: Prof. Dra. ANA MARÍA CASTILLO CLERICI.
Co-Orientador: Ing. Civ. RICHARD ARIEL ROLON GUILLÉN

Trabajo de Grado presentado a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,
Universidad Nacional de Asunción, como requisito para la obtención del Título de
Grado de la Licenciatura en Ciencias-Mención Geología.

Fecha de aprobación: 05 de agosto de 2021

MIEMBROS DE LA MESA EXAMINADORA DE TRABAJO DE GRADO

MIEMBROS:

Prof. Dra. Ana Maria Castillo Clerici

Universidad Nacional de Asunción, Paraguay

Prof. MSc. Sonia Mabel Molinas Ruíz Díaz

Universidad Nacional de Asunción, Paraguay

Prof. MSc. Narciso Cubas Villalba

Universidad Nacional de Asunción, Paraguay

DEDICATORIA

A mis padres, Hermes Catalina Domínguez de Almada y Carmelo Almada González

A mis hermanos, María Almada, Rocio Almada, Monserrath Almada y Carlos Almada.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por las bendiciones recibidas.

A mi padres, por darme las herramientas y fortalezas para seguir adelante.

A los Profesores, por la ayuda brindada a lo largo de esta etapa universitaria.

Al Ing. Richard Rolón y Ing. Ariel Bobadilla por siempre estar ahí, acompañándome y prestándome su ayuda incondicionalmente.

A mis Alumnos del Bachillerato Técnico Industrial del IPT, por acompañarme y apoyarme en todo momento.

ANÁLISIS DEL MANEJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN PROYECTOS DE OBRA CIVIL – ZONA BARRIO YCUÁ SATÍ, ASUNCIÓN-PARAGUAY.

Autora: MIRIAN CELESTE ALMADA DOMINGUEZ.
Orientadora: Prof. Dra. ANA MARÍA CASTILLO CLERICI.
Co Orientador: Ing. Civ. RICHARD ARIEL ROLON GUILLÉN.

RESUMEN

El manejo de aguas subterráneas en obras civiles es un proceso clave a seguir en las construcciones de edificios en zonas urbanas, razón por la cual se realizó este trabajo de investigación para evaluar las técnicas operativas utilizadas en obras ubicadas sobre acuíferos superficiales. La ciudad de Asunción se asienta sobre las areniscas de la Formación Patiño, escenario sobre el cual se construyen los edificios de gran porte. En ese sentido, existen riesgos imprevistos que podrían suceder en cualquier etapa de las obras, si no se tiene en cuenta la naturaleza hidrogeológica del lugar; tales como inundación en el fondo de la excavación, filtraciones y posteriormente inclinaciones, grietas y hasta derrumbes en el peor de los casos. Son situaciones que pueden ser prevenidas mediante el correcto estudio del terreno. Para llegar al análisis se recurrió a los ingenieros y geólogos expertos en geotecnia, quienes han aportado información a través de documentos e informes, de obras civiles en ejecución o ya ejecutadas, donde se detallan los métodos necesarios para poder realizar de forma segura y eficiente los trabajos de soporte para los edificios en zonas de riesgo. Queda claro que, tomando todas las precauciones, técnicas necesarias y realizando un monitoreo regular se puede lograr una construcción segura y sin riesgos a largo plazo.

Palabras Claves: Aguas subterráneas, Formación Patiño, obras civiles, geotecnia.

UNDERGROUND WATER MANAGEMENT ANALYSIS, IN CIVIL WORKS PROJECTS – NEIGHBORHOOD AREA YCUÁ SATÍ, ASUNCIÓN-PARAGUAY.

Author: MIRIAN CELESTE ALMADA DOMINGUEZ.
Advisor: Prof. Dra. ANA MARÍA CASTILLO CLERICI.
Co - Advisor: Ing. Civ. RICHARD ARIEL ROLON GUILLÉN.

SUMMARY

The management of underground water in civil works is an important process to do before the construction of buildings in urban areas, which is why this research was carried out to evaluate the operational techniques used in works located on aquifers. The city of Asunción is on the sandstones of the Patiño aquifer, place on which large buildings are built. In these cases, there are unforeseen risks that could happen at any stage of the works, if the hydrogeological nature of the place is not considered. such as flooding at the bottom of the excavation, seepage and later slopes, cracks and even collapses in the worst-case scenario. These situations can be prevented through the correct study of the ground. To reach the analysis, we worked with engineers and geologists experts in geotechnical, who have provided information through documents and reports, of civil works in execution or already executed, where the necessary methods are detailed to be able to carry out the safe and efficient support works for buildings in risk areas. By taking all the necessary precautions, techniques and regular monitoring, a safe and risk-free construction can be achieved in the long term.

Keywords: underground water, Patiño Formation, civil works, geotechnical.

ÍNDICE

	Página
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del Problema.....	1
1.2 Justificación.....	2
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo general:.....	2
1.3.2 Objetivos específicos:	2
1.4 Hipótesis.....	3
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1 Antecedentes	4
2.2 Geología regional	4
2.2.1 Formación Patiño	5
2.2.2 Formación Ñemby.....	7
2.2.3 Formación San Antonio	8
2.3 Suelo.....	8
2.4 Hidrología	9
2.5 Interacción de obras civiles con el medio hidrogeológico	11
2.6 Tensión efectiva. Postulado de Terzaghi	13
2.7 Asientos y subsidencias.....	14
2.8 Drenaje de un suelo granular bajo un muro de estrato compresible	16
2.9 Algunos riesgos imprevisibles y fenómenos singulares.....	17
2.9.1 Aguas surgentes en el fondo de la excavación.....	17
2.9.2 Filtraciones laterales.....	18
2.10 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.....	19
2.11 Límites de Atterberg	21
2.11.1 Límite Líquido (LL).....	21
2.11.2 Límite plástico (LP)	22
3. METODOLOGÍA	23
3.1 Materiales.....	23
3.2 Métodos.....	23
4. RESULTADOS.....	24
4.1 Localización	24
4.2 Edificios	25
4.2.1 Torres del Paseo la Galería	25
4.2.2 Edificio The Top	27
4.2.3 Edificios The World Trade Center.....	30
5. DISCUSIÓN.....	32
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	35
6.1 Conclusiones	35
6.2 Recomendaciones.....	35
ANEXOS	37
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41

LISTA DE TABLAS

Página

1. Clasificación de ensayos SPT.....	12
2. Clasificación USCS.....	21

LISTA DE FIGURAS

	Página
1. Mapa geológico – Departamento Central.....	5
2. Relieve de Asunción. Direcciones de la escorrentía y sitios donde se registraron indicios de manifestaciones magmáticas del Terciario.....	10
3. Municipios ubicados sobre el acuífero Patiño.....	11
4. Drenaje para descenso de nivel freático.....	16
5. Cuchara de Casagrande.....	22
6. Cilindros formados para un ensayo de LP.....	22
7. Mapa de localización del área de estudio.....	24
8. Edificios del Paseo La Galería, imagen virtual e imagen de obras en 2015...	25
9. Perfil estratigráfico y transversal.....	26
10. Imagen virtual Edificio The Top.....	27
11. Resultados ensayos de campo (SPT) y de laboratorio.....	28
12. Pantalla de micropilotes de la obra.....	29
13. Edificios del World Trade Center.....	30
14. Pantalla de micropilotes de los edificios del World Trade Center.....	33

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

ASTM	<i>(American Society of Testing Materials)</i> -Sociedad Americana para Pruebas y Materiales.
CPT	<i>(Cone Penetration Test)</i> Ensayo de cono holandés
LL	Límite líquido
LP	Límite plástico
N_B	Índice de Bosio
QGIS	<i>Quantum GIS</i>
SPT	<i>(Stándar Penetration Test)</i> Ensayo de penetración estándar
USCS	<i>(Unified Soil Classification System)</i> El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

1. INTRODUCCIÓN

En teoría el suelo puede encontrarse de varias formas, suelto, con partículas desorientadas, más o menos denso y con partículas acomodadas, dependiendo de las condiciones en las que se encuentra y de los diversos factores ambientales que lo afecten.

La ciudad de Asunción está asentada mayormente sobre la Formación Patiño, que está constituida por sedimentos conglomeráticos en la base y sedimentos arenosos hacia el techo, de una coloración roja y fanglomerados que poseen un fuerte control estructural (Proyecto PAR, 1986).

Las técnicas de control de aguas subterráneas en obras civiles son medidas implementadas en construcciones o excavaciones que se realizarán por debajo del nivel freático, si no se toman las decisiones adecuadas existiría el riesgo de que estas sean inestables o se inunden.

Dependiendo de la naturaleza del terreno y de la profundidad de la excavación existen soluciones convenientes, para tener en cuenta, que pueden llevarse a cabo a fin de evitar posibles efectos colaterales. Técnicas que, correctamente diseñadas y combinadas, pueden ser la respuesta al problema de control de niveles freáticos.

1.1 Planteamiento del Problema

El crecimiento urbano es un factor en aumento y con ello las modificaciones antrópicas al entorno del suelo y del componente geológico, más específicamente la del comportamiento del agua subterránea cuando existe presencia de las obras civiles, esto puede causar problemas graves en la realización de las construcciones

civiles por la interferencia del nivel freático, elevando los costos económicos y generando inconvenientes que pueden ser irreversibles.

Cada vez que una excavación se realiza por debajo del nivel freático, existen riesgos si no se toman las medidas adecuadas para evitarlo. Dichas medidas pueden consistir en barreras físicas que impidan el acceso del agua a la excavación o en bombeos que depriman los niveles por debajo de la base de esta o, una combinación de ambos.

De acuerdo con la incidencia de aguas subterráneas y la profundidad de la excavación ¿Se podrá prevenir inestabilidad o inundación de construcciones civiles en zonas con presencia de nivel freático elevado aplicando una combinación de técnicas de manejo de aguas subterráneas?

1.2 Justificación

Teniendo en cuenta la naturaleza del suelo subyacente en el área de estudio, las técnicas de manejo de aguas subterráneas son una herramienta de suma importancia para la construcción de fundaciones de las edificaciones, dado el crecimiento urbano en dicha zona corporativa, que puede servir para evitar riesgo en obras civiles. Ya que existe antecedentes de construcciones suspendidas por una mala implementación de estas e incumplimiento de disposiciones medioambientales hacen de esto un tema considerable y fundamental.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general:

- Evaluar las técnicas operativas de manejo de aguas subterráneas para construcción de fundaciones en edificios de altura en zonas urbanas.

1.3.2 Objetivos específicos:

- Identificar el comportamiento de aguas subterráneas de la zona de estudio.
- Investigar las técnicas para el control de aguas subterráneas en las obras civiles.
- Evaluar soluciones finales de manejo de aguas subterráneas aplicadas.

1.4 Hipótesis

Aplicando métodos combinados de depresión de napa freática y barreras físicas se puede prevenir inestabilidad o inundaciones en construcciones de obras civiles en zonas con presencia de aguas subterráneas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

En la actualidad en Paraguay se tienen escasas publicaciones sobre manejo de aguas subterráneas en obras civiles, en cambio sí existen trabajos sobre las características geotécnicas de la ciudad de Asunción como Ramírez et al. (2007) Carta geotécnica de la Ciudad de Asunción, describiendo las características geotécnicas de dicha región.

Bosio (2007) también realizó un trabajo sobre las propiedades físicas y mecánicas de las arenas cementadas y aspectos importantes del firme de Asunción.

2.2 Geología regional

La zona en estudio se ubica en el extremo noreste del rift de Asunción, el cual presenta unidades geomorfológicas con rasgos de colinas rebajadas, denominadas como lomadas y/o cerros aislados, algunos de los cerros están constituidos por rocas magmáticas del Terciario Medio en contacto con una secuencia sedimentaria de edad Cretácica -Cuaternaria denominado Grupo Asunción (Bosio, 2007).

En lo que concierne a la geología, Paraguay se ubica en el Área de dos grandes cuencas sedimentarias: en el este de la cuenca del Paraná y hacia el oeste la cuenca del Chaco. Ambas cuencas se hallan separadas hacia el norte por el Alto del Río Apa y hacia el sur por el Alto del Río Tebicuary, las mismas a su vez están separadas por el bajo de San Pedro. El Alto del Río Tebicuary presenta orientación noroeste – sureste y se halla afectada por la tectónica distensiva, el Graben de Acahay y el de Asunción. Estas estructuras de graben datan del Mesozoico y

probablemente se originaron en el Jurásico o el Cretácico Inferior, en el contexto de la ruptura del paleocontinente Gondwana (Proyecto PAR83/005, 1986).

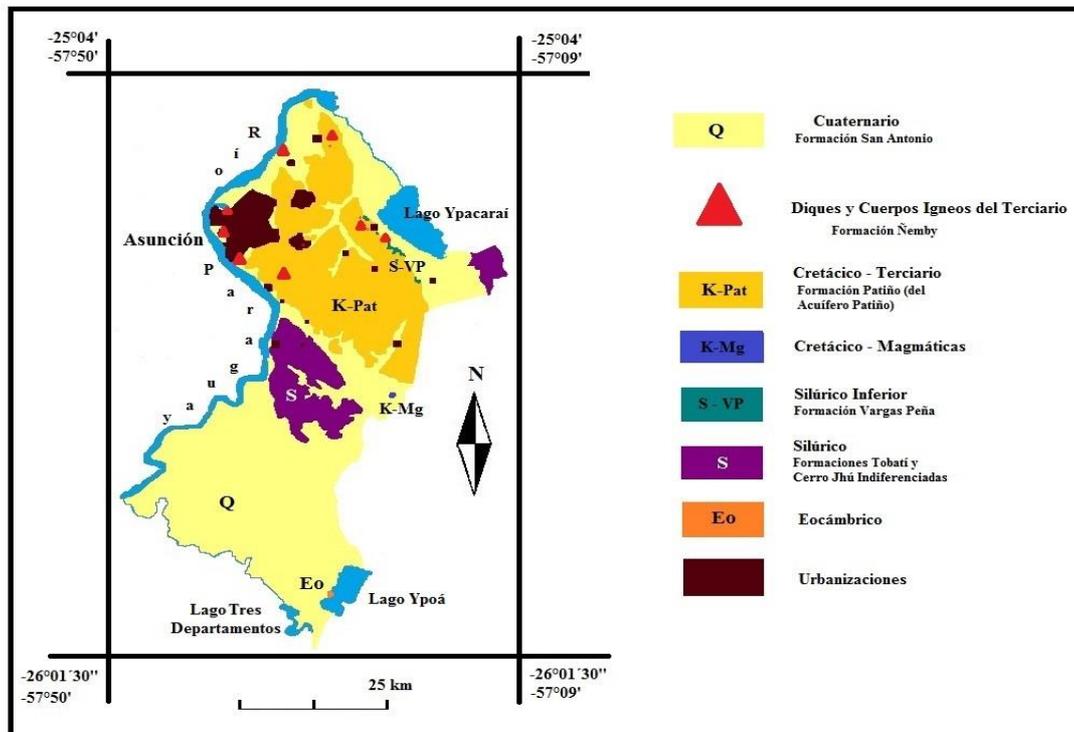


Figura 1: Mapa Geológico – Departamento central

Fuente: (www.geologiadelparaguay.com.py)

2.2.1 Formación Patiño

Aunque el inicio de la sedimentación de esta unidad es del Cretácico superior, esta formación es descrita en el capítulo referente al Cenozoico, teniendo en cuenta que el final de la deposición se sitúa probablemente en el Cenozoico inferior observada en la figura 1. La formación está constituida por sedimentos conglomeráticos en la base y arenosos hacia el techo. Posee fuerte coloración roja y afloran desde Asunción, hacia el SE, hasta Ybytymi, Caballero, en la depresión de Ypacaraí, una estructura asociada al Alto de Asunción. Fanglomerados de esta formación poseen un fuerte control estructural en su origen, constituyendo una auténtica tecto-facie. Se presenta también al W del río Paraguay, en Benjamín Aceval y Villa Hayes (Gómez Duarte, 1985). La denominación Patiño es debido a Spinzi (1983), que llamó Conglomerado Patino a sedimentos estudiados en el levantamiento geológico del cerro Patiño, Areguá y alrededores. El espesor promedio

de la formación está estimado en 150 metros y la unidad abarca un área de 1.777 km².

Las capas conglomeráticas poseen una secuencia granulométrica decreciente, de abajo hacia arriba, muy bien expuesta en las localidades de San Antonio, Ypané, Arroyo Ytororó, Cerro Perú (Paraguarí), Compañía Salado-í (al norte de Limpio) y Cerro Patiño, donde se encuentra la exposición más completa de la formación. Los cantos de los conglomerados, con tamaños de hasta 40 cm., muestran una "suite" completa de las rocas regionales, incluso cantos de areniscas silicificadas de la Formación Misiones, de las intrusivas, alcalinas y rocas del Silúrico. En dirección al techo de la unidad hay una disminución de las capas conglomeráticas, con aumento de espesor de las capas arenosas (Bosio, 2007).

En la margen occidental del río Paraguay, cerca de las localidades de Villa Hayes y Benjamín Aceval, afloran sedimentos correlacionables a esta formación asociados a las intrusivas básicas de la Formación Ñemby. Las exposiciones de estos sedimentos de la Formación Patiño, en el margen occidental del río Paraguay, no muestran los potentes conglomerados con estratificación gradativa presente en el área de Limpio y más al SE en cerro Perú. La constitución granulométrica de las areniscas, no obstante, es la misma, con una matriz más fina y granos bien gruesos dispersos en esta matriz.

La disposición tridimensional de los cuerpos conglomeráticos es una indicación de que se tratan de conglomerados que rellenaron el "graben" de Asunción o depresión de Ypacaraí. El área de mayor potencia deposicional es hacia el E.

La formación contiene en su fase conglomerática, cantos de las intrusivas alcalinas del Jurásico superior. Son, por tanto, más jóvenes que el Jurásico superior. Por otro lado, son cortadas por las intrusivas basaníticas de la Formación Ñemby, de edad Oligocénica/Miocénica (Terciario), su límite de edad superior (Proyecto PAR83/005, 1986).

2.2.2 Formación Ñemby

El Terciario, en la cuenca del Paraná, está caracterizado por fuertes movimientos verticales cerca de sus bordes y compartimentación en su interior. En el borde oriental, estos movimientos están asociados a la evolución de las cuencas costeras del tipo Atlántico, pero en el Paraguay Oriental, estos movimientos verticales están también asociados a las fases tecto-orogénicas. Los movimientos verticales asociados a ciclos magmáticos, con la reactivación de las antiguas líneas de fallas, en el área de Asunción, inician un verdadero proceso "rift" con la intrusión de las volcánicas de la Formación Ñemby. (Palmieri J.H. - Velázquez, J.C., 1982 en Bosio J., 2007).

El último ciclo magmático registrado está registrado desde el Cretácico Inferior al Oligoceno pero es más representativo en el Eoceno, datado en 61 a 39 MA (Velázquez *et al*, 1.992 en Castillo, A. 2005), constituido por rocas ultra-alcalina del tipo sódicas, basanitas a fonotrefitas, alcali-basaltos y lavas traquiandesitas, que se encuentran en los alrededores de Asunción (Ñemby, Lambaré, Tacumbú y diques), también se encuentran localizadas cerca de las ciudades de Paraguarí, Sapucaí, La Colmena y Acahay (Castillo, A., 2005).

El hundimiento del Arco Asunción, en la región del Bajo San Pedro, debe estar relacionado con este proceso. La Formación Ñemby está constituida por intrusivas ultrabásicas que contienen grandes cristales de olivino. Estos lezholitas poseen aproximadamente una edad de 46 m.a. (Oligoceno-Mioceno) y están expuestos bajo la forma de diques "stocks" y cuerpos mayores (Ñemby-Lambaré y Tacumbú), en el área de Asunción, y también, en la margen occidental del río Paraguay (Villa Hayes y Benjamín Aceval). Abarca un área de 5 km², en afloramientos.

Una manifestación volcánica de esta importancia, con material ligado al producto proveniente del manto, sugiere una anomalía crustal de gran magnitud para el área de Asunción. Se trata, en realidad, de un "rift" incipiente asociado al abatimiento de una megaestructura (Arco de Asunción) (Proyecto PAR83/005, 1986).

2.2.3 Formación San Antonio

Están aquí agrupados los sedimentos acumulados, próximo al área del río Paraguay y sus afluentes, que se encuentran en una cota más baja de 70 metros, en la Región Oriental del país. Cubre un área de 60.782 km². Está constituida por una arenisca de color crema, de granulación media a gruesa con gravillas dispersas, intercaladas con lutitas. Las areniscas, en contacto con estas lutitas, presentan clastos de arcilla. Existen también capas de areniscas arcillosas hasta de 1,5 metros de espesor. El ambiente de sedimentación es fluvial.

Suelo arenoso mal seleccionado de espesores diferentes, considerados residuales y gravas de clastos angulosos de cuarcitas e ígneas básicas, en algunos casos diagenizadas, se manifiestan en barrancos o lomadas (Gómez, D. 1991)

En los valles de la red de drenaje actual del Paraguay Oriental, desde el río Apa, al norte, hasta el río Paraná, al sur y este, y el río Paraguay, al oeste, se presenta una amplia deposición de sedimentos de edad holocénica (Proyecto PAR83/005, 1986).

2.3 Suelo

El suelo es un recurso natural único, que sustenta muchas de las economías agrícolas mundiales. Más allá de su rol fundamental en los ecosistemas y la economía, y a diferencia del agua y el aire, es considerado un recurso limitado. Constituyen la base para la producción de alimentos; sin embargo, la degradación global de los suelos representa una amenaza latente.

El crecimiento poblacional demandará una mayor producción de alimentos y servicios ambientales, incrementándose la presión sobre los suelos, por lo que se vuelve crítico contar con suelos fértiles, considerando que el mismo proporciona los macro y micronutrientes que las plantas necesitan para poder concluir su ciclo (Gardi et al. 2014; Miretti *et al.* 2012).

La característica del suelo de la ciudad de Asunción según la Soil Taxonomy y estudios anteriores pertenece a un Sub Grupo Rhodic; Gran kandiudalf, esta característica de suelo presenta un textura grosera de areno franco a franco

arenoso, con un paisaje característico de lomada, de origen de areniscas, con relieve de 3 a 8 %, con drenaje bueno casi en todo el área, la rocosidad no se observa hasta los 1.80 m (López, O., *et al.* 1995).

Juan José Bosio (2007) define al suelo de la ciudad de Asunción como arenas cementadas, refiriéndose a sedimentos endurecidos muy densos, que se encuentran en una transición entre partículas no consolidados y areniscas, que fueron sometidos a un proceso de diagénesis moderada y no llegaron a constituirse en roca. De acuerdo con el autor, esto constituye el suelo firme sobre el cual se asientan la mayoría de los edificios de mediano y gran porte de Asunción y alrededores.

2.4 Hidrogeología

En Asunción, el comportamiento del agua, principalmente el de lluvia, se relaciona con factores como el relieve, la geología del lugar y la posibilidad de escurrimiento en dirección a los cursos de agua, principales arroyos y cauces menores. Los factores están ligados a fenómenos de tiempo severo que acarrear consigo lluvias torrenciales frecuentes de corta duración. La geomorfología de Asunción, tras una gran precipitación de poca duración, presenta eventos caracterizados por un escurrimiento superficial débil, con trechos dinámicos acentuados en terrenos bajos, asociados a una alta tasa de declividad y áreas con pobre cobertura vegetal (Velázquez y Pflugfelder, 1997. En Bosio 2007). En la figura 2 podemos observar un mapa del relieve de la ciudad de Asunción con direcciones de las escorrentías y lugares con indicios de manifestaciones magmáticas.

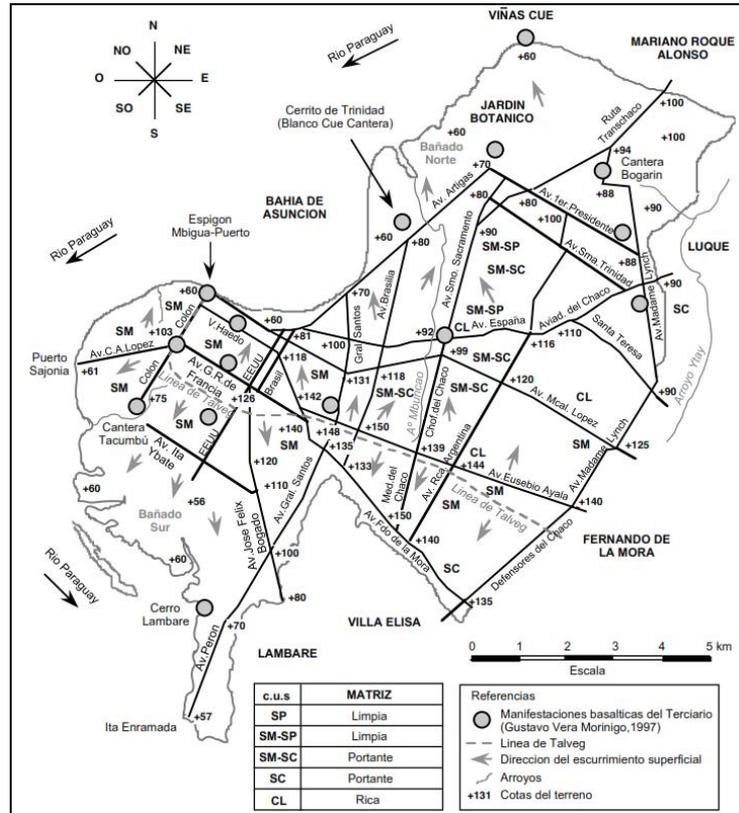


Figura 2: Relieve de Asunción. Direcciones de la escorrentía y sitios donde se registraron indicios de manifestaciones magmáticas del Terciario.
 Fuente: Características geotécnicas del Firme de Asunción (Vera, 1997 en Bosio, 2007)

Como se menciona en apartados anteriores, el paquete sedimentario que se encuentra desarrollado dentro del área de Asunción y Gran Asunción es denominado Formación Patiño, del Grupo Asunción (Proyecto PAR 83/005). Dicha Formación es la que contiene al acuífero Patiño, que son las aguas subterráneas en cuestión, presenta una morfología similar a la de un triángulo, sobre el cual se encuentran asentados los Municipios que se observan en la figura 3. Las aguas del acuífero están contenidas en rocas sedimentarias de una edad Cretácica, formadas en el lapso del relleno del graben de Asunción y que posteriormente fueron expuestas por eventos tectónicos (Carvalho, F. y Villar, F. 2015. En Gadea, M. 2017).

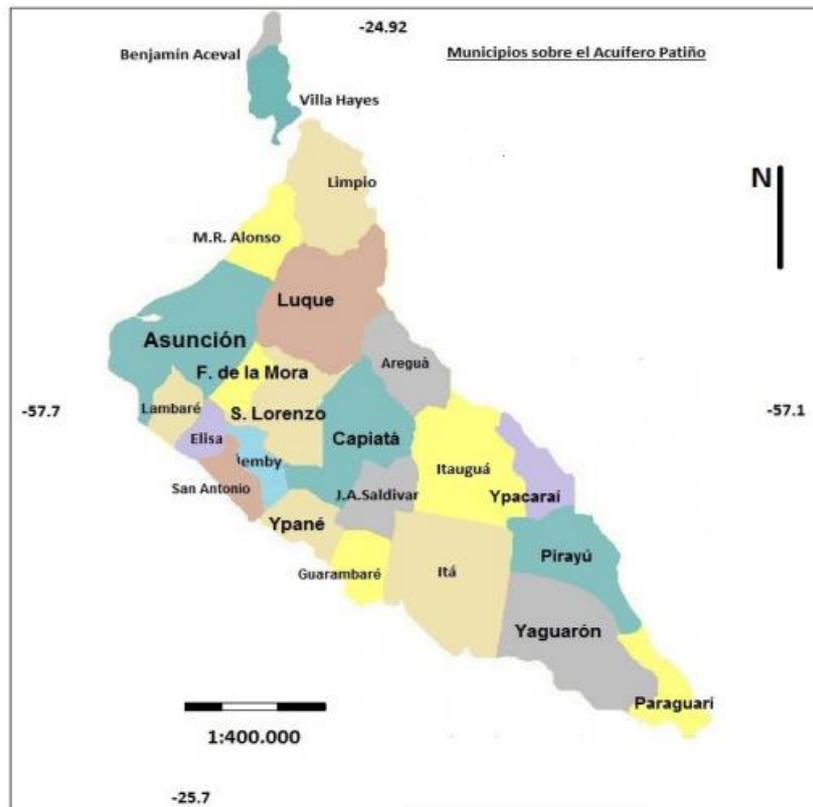


Figura 3: Municipios ubicados sobre el acuífero Patiño
Fuente: Gadea, M. 2017. Modificado de ERSSAN

2.5 Interacción de obras civiles con el medio hidrogeológico

Por definición, un suelo puede estar formado desde un estado más suelto, con partículas desorientadas, hasta un estado más denso con partículas acomodadas. En su estado más suelto, un suelo puede ser producido en el laboratorio dejando caer los sedimentos lentamente a una corta distancia a través de agua. Una configuración más densa se podría obtener a partir de un fuerte prensado de las muestra en óptimas condiciones de humedad. De manera natural, la mayoría de los suelos existen entre estos dos extremos, dependiendo del modo de depositación y las presiones que pudieron haber sufrido a lo largo de su historia geológica (Tarbuck, E. & Lutgens. J. 2005)

De acuerdo con varios autores, los suelos graduados pueden alcanzar una mayor densidad que aquellos de partículas uniformes. A su vez, los suelos de sedimentos angulares pueden alcanzar mayor densidad que los redondeados. Estas

características condicionan de forma significativa su conductividad hidráulica. A partir de la densidad relativa de una muestra se podría definir su densidad natural frente al valor máximo que esta podría alcanzar (Custodio, E. & Llamas, M. 1983).

Aunque en teoría parece sencillo, determinar el valor no lo es y por ello existen varios tipos de ensayos. La densidad relativa de un suelo se relaciona especialmente con las propiedades mecánicas e hidráulicas de este. Determinar su cohesividad no es fácil debido a los procesos de obtención de la muestra y la dificultad aumenta con respecto a la profundidad (Custodio, E. & Llamas, M. 1983).

Por ello, la densidad relativa de un suelo de grano grueso se determina por la correlación con su resistencia a la penetración, siendo los ensayos más utilizados los conocidos como *Stándar Penetration Test (SPT)* y *Cone Penetrati3n Test (CPT)*. Para el caso de los ensayos SPT se realiza mediante la introducci3n de un tomamuestras tubular con una puntaza ciega de masa 63,5 kg que cae repetidamente desde una altura de 76,2 cm. Se contabiliza el n3mero de golpes necesarios para penetrar 15 cm, si el n3mero de golpes es superior a 50 el resultado del ensayo pasa a llamarse rechazo (Ferrer, A. 2008).

Seguidamente facilitamos una tabla de clasificaci3n (Tabla 1), seg3n su densidad, de suelos resultado del conteo de n3mero de golpes del ensayo SPT, normalizado (ASTM D1586)

Tabla 1: Clasificaci3n por SPT

Suelos Granulares		Suelos cohesivos	
0-10	Suelto	0-4	Blando
10-30	Densidad media	4-8	Dureza media
30-50	Denso	8-15	Duro
>50	Muy denso	15-30	Muy duro

Fuente: (Geotecnia f3cil, 2020)

A medida que aumenta la densidad relativa, disminuye la compresibilidad y la conductividad hidráulica.

Peso espec3fico seco de un suelo es determinado por el peso de una muestra seca de volumen conocido. El peso espec3fico seco de un suelo depende de la porosidad de la muestra y del peso espec3fico de las part3culas del suelo. La

composición de los minerales no varía significativamente en cuanto a su peso específico, por tanto, será la porosidad lo que realmente afecte al valor de la unidad de peso en seco. En suelos granulares naturales, podemos encontrar rangos de valores de peso específico seco desde $14,1 \text{ kN/m}^3$, correspondiente a arenas sueltas uniformes, a valores de $20,4 \text{ kN/m}^3$, correspondiente a bloques de muestra densa. Los suelos naturales no existen en condiciones totalmente secos, pues algo de humedad existirá siempre en sus poros (Ferrer, A. 2008).

2.6 Tensión efectiva. Postulado de Terzaghi

Los ensayos de densidad del suelo son complejos, teniendo en cuenta su estructura y la cadena de transmisión de cargas. Dicha complejidad se ve incrementada en suelos de alto contenido de sedimentos finos, tales como las arcillas, en las que las fuerzas gravitacionales pierden relevancia en comparación a las fuerzas físico-químicas.

“Las tensiones en cualquier punto de un plano que atraviesa una masa de suelo pueden ser calculados a partir de las tensiones principales totales que actúan en ese punto. Si los poros del suelo se encuentran llenos de agua bajo una presión, las tensiones principales totales se componen de dos partes. Una parte, llamada presión neutra o presión intersticial, que actúa sobre el agua y sobre las partículas sólidas en todas direcciones y con igual intensidad. Las diferencias representan un exceso de presión sobre la presión neutra y actúan exclusivamente en la fase sólida del suelo. Estas fracciones de las tensiones principales totales se denominan tensiones efectivas. Cualquier efecto medible debido a un cambio de tensiones, tal como la compresión, la distorsión o la modificación de la resistencia al corte de un suelo, es debido exclusivamente a cambios en las tensiones efectivas” (Ferrer, A. 2008).

Podemos decir con respecto a lo anterior que, si en un suelo saturado no se produce cambio de volumen o distorsión alguna, es porque sus tensiones efectivas no han variado. Como el agua no es capaz de soportar tensiones que existen en un suelo saturado, entonces las debe absorber el esqueleto sólido, en este caso, el suelo. Si puede modificarse las tensiones totales y la presión intersticial, permitiendo el drenaje, el suelo se deforma y se modifica su resistencia al corte (Ferrer, A. 2008).

2.7 Asientos y subsidencias

Un adecuado planteamiento de un sistema de control artificial de nivel freático, en algunas ocasiones, puede provocar asentamientos en el área alrededor del terreno de obras. De acuerdo con Ferrer A. (2008) los asentamientos se pueden producir debido principalmente a:

- Instalaciones de bombeo inapropiadas:
 - a. Se extraen arenas o sedimentos finos procedentes del suelo por causa de un diseño inapropiado o mala ejecución de los pozos de bombeo. La erosión de suelo provocará tubificación y pérdida de este.
 - b. Realización de bombeos superficiales abiertos en áreas con presencia de muros, pantallas o cualquier barrera física, teniendo como resultado la erosión del suelo, sifonamientos o con movimientos del suelo exterior.
 - c. Ingreso de suelo por vías horizontales a causa de fallos o defectos en los muros, pantallas o barreras físicas. Esto también podría derivar en tubificaciones.

- Oscilaciones naturales o con bombeos de diseño correcto:
 - d. Debido a la consolidación y compresión provocadas por la reducción de las presiones intersticiales, principalmente en limos y arcillas, incrementarán las tensiones efectivas. Este incremento de las tensiones efectivas provocará un acomodamiento de los sedimentos del suelo, aumentando su densidad y en consecuencia disminuyendo su volumen, lo que se traduciría en asentamiento. De esta forma, las estructuras que se encuentren cimentadas sobre este tipo de depósitos pueden verse afectadas. Para estructuras soportadas sobre pilotes, esta consolidación puede provocar un arrastre por fricción negativa en el contacto entre la superficie del pilote y el terreno.

Las consecuencias incluidas en el grupo **a**, pueden ser prevenidas a partir de un diseño adecuado e instalación correcta del sistema de pozos. Se sugiere que si tras iniciado el primer bombeo y haberlo mantenido de forma ininterrumpida durante un periodo de entre 30 minutos y 3 horas, se observa que el agua bombeada contiene un grado de sedimentos finos no aceptable, el sistema de bombeo debe ser detenido y realizar una evaluación de las consecuencias que pudieran vulnerar el entorno. Es importante realizar un control sobre los materiales durante las exploración corresponden a los indicados en los informes previos. Además de un buen diseño y ejecución, es necesario realizar un monitoreo sobre los trabajos realizados que permitan confirmar la validez del plan original de acuerdo con las condiciones del suelo previamente estudiado.

En cuanto a lo descrito en el grupo **b**, el bombeo debe ser detenido de inmediato y analizar las posibles alteraciones que pudieran haberse ocasionado al suelo, para posteriormente plantear un bombeo alternativo. Generalmente deberá ser resuelto con bombeos en profundidad, mediante pozos penetrantes a cota inferior a la que se ha producido el fallo. Como consecuencia de lo anterior podría producirse una rotura de fondo o sifonamiento.

Los fallos englobados en el grupo **c**, por deficiente construcción de muros de contención, implicará extremar las precauciones en el proceso de la excavación hasta descubrir la vía de infiltración.

Los englobados en el grupo **d**, pueden producirse debido al drenaje de suelo compresibles, como limos, arcillas o turbas, presentándose asentamiento en el entorno inmediato. En este supuesto caso le mejor sería la realización de un estudio detallado de las posibles consecuencias. Así es que en presencia de este tipo de suelo se debe extremar precaucione.

Si un suelo se encuentra en la actualidad con el mayor grado de carga que ha soportado a lo largo de su historia, se le denomina normalmente consolidado. Si por el contrario en un tiempo pasado ha sido sometido a una sobrecarga, por ejemplo, derivada de un drenaje anterior que provocó unas sobrepresiones o de un suelo actualmente erosionado, ese suelo se denomina preconsolidado o sobreconsolidado.

Esta máxima presión a la que fue sometido se denomina presión de preconsolidación (Ferrer, A. 2008).

2.8 Drenaje de un suelo granular bajo un muro de estrato compresible

Analizamos el supuesto caso de un suelo formado un estrato de limo orgánico de espesor significativo y bajo este se encuentra un acuífero formado por arenas densas y gravas.

Se necesita un vaciado de tierras cuya máxima excavación alcanza parcialmente al acuífero formado por los granulares inferiores, para lo cual se precisará provocar artificialmente un descenso de nivel freático mediante un sistema de pozos. En la figura 4 se observa un diagrama de un método de drenaje y descenso del nivel freático mediante un sistema de pozos.

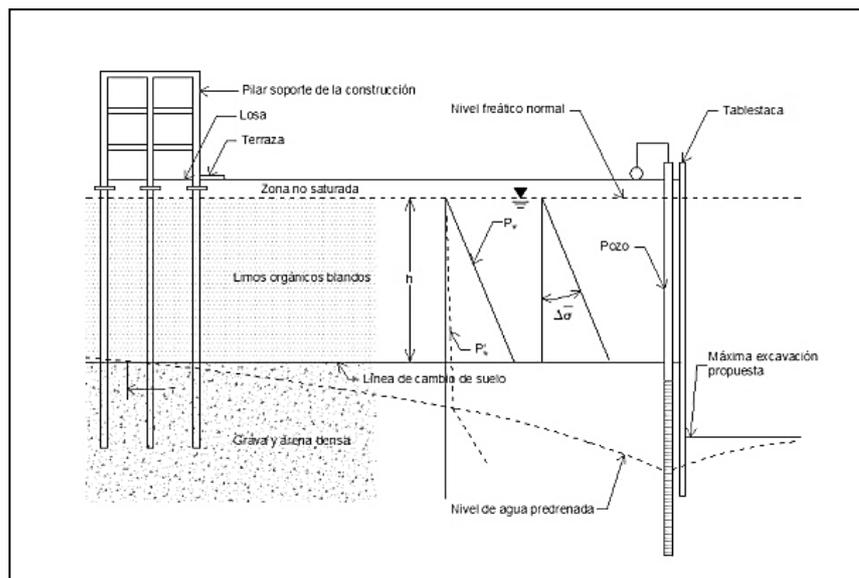


Figura 4: Drenaje para descenso de nivel freático

Fuente: Control de las aguas subterráneas en la construcción (Ferrer, A. 2008)

Las arenas y las gravas pueden ser drenadas en cuestión de horas o días. En cambio, el drenaje del limo, por ser de baja conductividad hidráulica, se prolongará mucho más en el tiempo, incluso semanas.

Si se provoca la desaturación del estrato subyacente al estrato de limos, se libera presión intersticial en la zona de contacto limo-arenas. Como han sido separados hidráulicamente, del limo más saturado, por su menor velocidad de

drenaje, se producirá un flujo descendente y la presión intersticial se reducirá a un valor prácticamente despreciable (Ferrer, A. 2008)

Las arenas densas y las gravas del estrato subyacente pueden absorber este leve incremento de tensión efectiva a esa profundidad, sin consolidación significativa. Debemos tener presente que la tensión total vertical que soporta no ha variado, dado que el estrato de limos permanece saturado en este supuesto y para ese tiempo de drenaje inicial dado.

En cambio, el estrato de limo comenzará a consolidarse, esto dependerá también de varios factores como la presión de preconsolidación, la compresibilidad del limo y la duración del bombeo. La liberación del agua de este estrato está ligada a la baja conductividad hidráulica y por lo tanto al tiempo de consolidación (Ferrer, A. 2008)

2.9 Algunos riesgos imprevisibles y fenómenos singulares.

Además de los riesgos previsible, existen otros que podrían aparecer durante la excavación. Este tipo de problemas, tras su detección, debe ser analizado inmediatamente, considerando todas las posibles consecuencias que pudieran acarrear si estos permanecen durante el avance de la obra, sin ningún tipo de medidas correctoras.

La experiencia tiene un papel decisivo en la inmediata identificación de estos fallos, así como la correcta aplicación de las medidas, garantizando la estabilidad de las obras y su entorno. Otro problema habitual en una excavación es cuando por un incorrecto sistema o fallo de montaje y ejecución de un muro de contención se producen filtraciones laterales de agua (Ferrer, A. 2008)

2.9.1 Aguas surgentes en el fondo de la excavación

Es notable la cantidad de dificultades que se podrían presentar al ejecutar una excavación, cuando ya se procedió al drenaje hasta la cota objetivo, pero aun así aparece una vía puntual de agua en la base, incluso antes de llegar a la cota máxima de dicha excavación. En algunas ocasiones estas vías de aguas tienen su origen en los

sondeos realizados para reconocimiento de suelo, de los estudios geotécnicos previos a la construcción.

De acuerdo con Ferrer, A. (2008) los sondeos de reconocimiento del suelo, por su objeto, penetran en el subsuelo más allá de la profundidad requerida por la excavación de la cimentación. Por tanto, estos sondeos pueden alcanzar acuíferos confinados subyacentes a la excavación, sirviendo de vía y actuando como descompresores pasivos, creando un “manantial” en el fondo de la excavación. Otro origen de surgencia puede tener su causa en antiguos pozos ubicados en el terreno objeto de construcción, que daban servicio a edificios preexistentes.

Si el estrato en cuestión está constituido por suelo de baja permeabilidad, pero de moderada a alta cohesión, la surgencia se manifestará de manera puntual y localizada. Si, por el contrario, el suelo carece de cohesión, el agua surgente ocasionará una erosión en las paredes del sondeo, lo cual dará un aumento de diámetro y caudal, a medida que continúe la surgencia.

2.9.2 Filtraciones laterales

Como menciona Ferrer, A. (2008), otro de los riesgos que, por ser imprevisible, no es evaluado en el planteamiento inicial del sistema de control de aguas lo hallamos en las entradas de agua a la obra, a través de los muros de contención del suelo, tales como juntas o fallos constructivos de los muros pantalla, encuentros de pilotes o micropilotes de confinamiento.

Estas filtraciones de aguas de forma lateral, además de dificultar e impedir los trabajos de excavación, podrían provocar daños en las obras, ya que generalmente vienen acompañadas de importantes arrastres de suelos.

Cuando se han previsto muros de contención de hormigón y la excavación es inferior al nivel freático, pueden aparecer infiltraciones laterales a través de las juntas de unión. Un sistema de control de nivel freático, no evitará las posibles infiltraciones, por lo que deben ser tratadas de forma puntual y aislada.

En algunas ocasiones, las aguas procedentes de filtraciones laterales se pueden controlar mediante drenajes horizontales, habilitando zanjas ubicadas entre el muro de contención y el fondo de la excavación, a través de drenes que conduzcan el agua a puntos de bombeos superficiales. Si, por el contrario, estas filtraciones están acompañadas de sedimentos como arenas o más finos, deben ser tratadas de inmediato. En general se trata con sellados que eviten la erosión de suelo detrás de los muros de contención que pudieran generar cavidades, ya que estas podrían generar colapso de suelos y derivar en socavones superficiales.

Una posible alternativa al sellado de estas vías laterales, podría ser la instalación de un segundo e independiente sistema de bombeo exterior, que provoque un descenso del potencial hidráulico por debajo de la ubicación de los anclajes o vía de agua en general. Con carácter general, esta alternativa tendrá un coste superior al resultante de la aplicación de otras métodos (Ferrer, A. 2008).

2.10 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (*Unified Soil Classification System*) (USCS), presentado por Arthur Casagrande, es usado para describir la textura y el tamaño de las partículas de un suelo. Este sistema de clasificación puede ser aplicado a la mayoría de los materiales sin consolidar y se puede clasificar suelos con tamaños menores de tres (3) pulgadas; se representa mediante un símbolo con dos letras.

Los suelos de sedimento grueso y fino se distinguen mediante el tamizado del material, por el tamiz N° 200. Los sedimentos gruesos corresponden a los retenidos en dicho tamiz y los finos a los que lo pasan, de esta forma se considera que un suelo es grueso si más del 50% de las partículas de este son retenidas en dicho tamiz, y fino si más del 50% de sus partículas son menores.

Los suelos se designan por símbolos de grupo. El símbolo de cada grupo consta de un prefijo y un sufijo. Los prefijos son las iniciales de los nombres en inglés de los seis principales tipos de suelos (grava, arena, limo, arcilla, suelos

orgánicos de grano fino y turbas), mientras que los sufijos indican subdivisiones en dichos grupos (Geología publicaciones, 2019).

Esta clasificación divide los suelos en:

- Suelos gruesos. Se dividen en gravas y arena, y se separan con el tamiz N° 4, de manera que un suelo pertenece al grupo de grava si más del 50% es retenido por dicho tamiz y pertenecerá al grupo arena en caso contrario.
- Suelos finos. El sistema unificado considera los suelos finos divididos entre grupos: limos inorgánicos (M), arcillas inorgánicas (C) y limos y arcillas orgánicas (O). Cada uno de estos suelos se subdivide a su vez según su límite líquido, en dos grupos cuya frontera es $Ll = 50\%$. Si el límite líquido del suelo es menor de 50 se añade al símbolo general la letra L (*low compressibility*). Si es mayor de 50 se añade la letra H (*high compressibility*). Obteniéndose de este modo los siguientes tipos de suelos:

ML: Limos inorgánicos de baja compresibilidad.

OL: Limos y arcillas orgánicas.

CL: Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad.

CH. Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad.

MH: Limos inorgánicos de alta compresibilidad.

OH: Arcillas y limos orgánicas de alta compresibilidad.

- Suelos orgánicos. Constituidos fundamentalmente por materia orgánica. Son inservibles como terreno para cimentación.

A continuación, se presenta la tabla 2, en la cual se muestra el sistema unificado de clasificación de suelo.

Tabla 2: Clasificación USCS

Tipo de Suelo	Prefijo	Subgrupo	Sufijo
Grava	G	Bien gradada	W
Arena	S	Pobremente gradada	P
Limo	M	Limoso	M
Arcilla	C	Arcilloso	C
Orgánico	O	Límite líquido alto (>50)	L
Turba	Pt	Límite líquido bajo (<50)	H

Fuente: (Geología publicaciones, 2019)

2.11 Límites de Atterberg

De acuerdo con Geotecnia fácil (2020), los límites de Atterberg pueden definirse como los límites del contenido de humedad que caracterizan los cuatro estados de consistencia de un suelo de grano fino: estado sólido, estado semisólido, estado plástico y estado semilíquido o viscoso.

El límite entre los estados sólido y semisólido se denomina **límite de retracción**; el límite entre los estados semisólido y plástico se llama **límite plástico** y el límite entre los estados plástico y semilíquido, **límite líquido**. De este modo, dependiendo de la humedad un suelo de grano fino puede pasar de un estado de consistencia a otro.

2.11.1 Límite Líquido (LL)

El límite líquido es un ensayo que se determina de forma estandarizada mediante la **cuchara de Casagrande**, la que se observa en la figura 5. Para ello se mide la humedad de un suelo en un surco que se cierra una distancia aproximada de 13 mm tras dejar caer la cuchara de Casagrande 25 veces desde una altura de 1 cm. El surco se realiza con un acanalador estandarizado (Geotecnia fácil, 2020).



Figura 5: Cuchara de Casagrande

Fuente: Geotecnia fácil (2020)

2.11.2 Límite plástico (LP)

El límite plástico se determina mediante la formación de pequeños cilindros, como se muestra en la figura 6, en la palma de la mano sobre una superficie lisa de unos 3 mm de diámetro y 25-30 mm de longitud. En el momento en el que los pequeños elipsoides se cuartean en trozos de aproximadamente 6 mm se ha alcanzado la humedad del límite plástico (Geotecnia fácil, 2020).



Figura 6: Cilindros formados para un ensayo de LP

Fuente: Geotecnia fácil(2020)

3. METODOLOGÍA

La metodología de investigación es con un enfoque cualitativo, realizando un análisis profundo, buscando ampliar las posibilidades de reducir riesgos a corto y largo plazo.

La investigación con un enfoque cualitativo utiliza como método la recolección de datos sin una medición cuantitativa, descubriendo y afinando preguntas de investigación, y que pueden o no probar la hipótesis en su proceso de interpretación (Sampieri, 2014).

3.1 Materiales

Diseño de entrevista, elaboración de esquema para entrevista a los ingenieros y geólogos profesionales en el campo de la geotecnia. También a ingenieros encargados de obras en la zona de estudio.

Softwares como *Google Earth* y *Qgis* para elaboración de mapa de localización y establecer las coordenadas de ubicación de los edificios analizados.

3.2 Métodos

Evaluación de las técnicas operativas del manejo de aguas subterráneas a través del análisis de los informes técnicos, mediante estudio de casos particulares en la zona de estudio, recopilando datos de los encargados de obras recientes o en ejecución. Zona de estudio: barrio Ycuá Satí de la ciudad de Asunción.

4. RESULTADOS

4.1 Localización

La ciudad de Asunción, capital de la República del Paraguay, se encuentra ubicada entre las coordenadas 25°15'00" - 25°22'18" de latitud sur, y 57°36'33" - 57°41'36,6" longitud oeste. Los límites físicos son: El río Paraguay, las calles Soldado Robustiano Quintana y Camilo San Blas, Avenida Madame Lynch, la Avenida Defensores del Chaco, las Avenidas Fernando de la Mora y Gral. Santos, y la Avenida Teniente General Juan D. Perón. Posee una población aproximada de 521.101 habitantes (INE, 2021), la mayor concentración urbana del país, en una superficie de 117 km².

El área de estudio se encuentra localizada entre los barrios Ycuá Satí y Manorá (Figura 7), de la ciudad de Asunción. Entre las avenidas Aviadores del Chaco y Santa Teresa

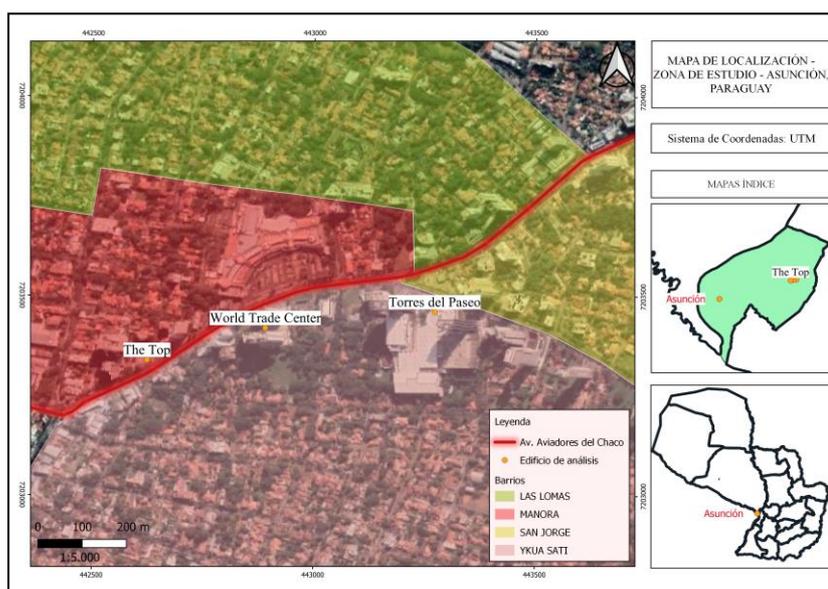


Figura 7: Mapa de localización del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia

4.2 Edificios

4.2.1 Torres del Paseo la Galería

El proyecto Paseo La Galería (Figura 8) es un mega emprendimiento de oficinas corporativas, *retail*, gastronomía y entretenimiento que constituye una de las mayores inversiones civiles en Asunción. Se ubica según las coordenadas -25.285110, -57.563781. Consistió en la construcción de dos torres de veintitrés pisos de 100m de altura, tres centros comerciales y dos edificios de estacionamiento con una capacidad para 2500 vehículos en un predio de 50.000m² (Arroyos, F., *et al.* 2015).



Figura 8: Edificios del Paseo La Galería, imagen virtual e imagen de obras en 2015
Fuente: Obras geotécnicas en el Paseo La Galería, Asunción, Paraguay. (Arroyos, F., *et al.* 2015)

Caracterización geotécnica del sitio

Las obras geotécnicas del proyecto consistieron en la excavación de todo el predio para la construcción de las fundaciones de los siete edificios y subsuelos, la contención de los cortes, los sistemas de drenaje y las fundaciones de las estructuras. Se efectuaron más de 250.000m³ de movimiento de suelos y se diseñaron y construyeron más de cuatrocientas fundaciones y estructuras de contención para más de 600m de extensión. Los diseños ejecutados incluyen fundaciones indirectas, zapatas, plateas, fundaciones apoyadas sobre columnas de grava, muros de hormigón armado y pantalla de pilotes con viga de coronamiento.

Perfil estratigráfico

De acuerdo con Arroyos, F., *et al* (2015), la campaña geotécnica estuvo compuesta por la ejecución de calicatas y sondeos con ensayos SPT, extracción de testigos, resistividad eléctrica, permeabilidad y ensayos de veleta. En cuanto a las calicatas se ejecutaron también ensayos de carga en placa horizontal. En laboratorio se efectuaron ensayos de caracterización física, química y mecánica. Se distinguieron tres unidades geotécnicas:

- Arenas y arenas arcillosas medianamente densas a densas con algunos sectores puntuales descomprimidos.
- Arenas semiconsolidadas muy duras
- Arenas muy densas.

En la Figura 9 se indica un perfil estratigráfico longitudinal y transversal en correspondencia con el eje del predio.

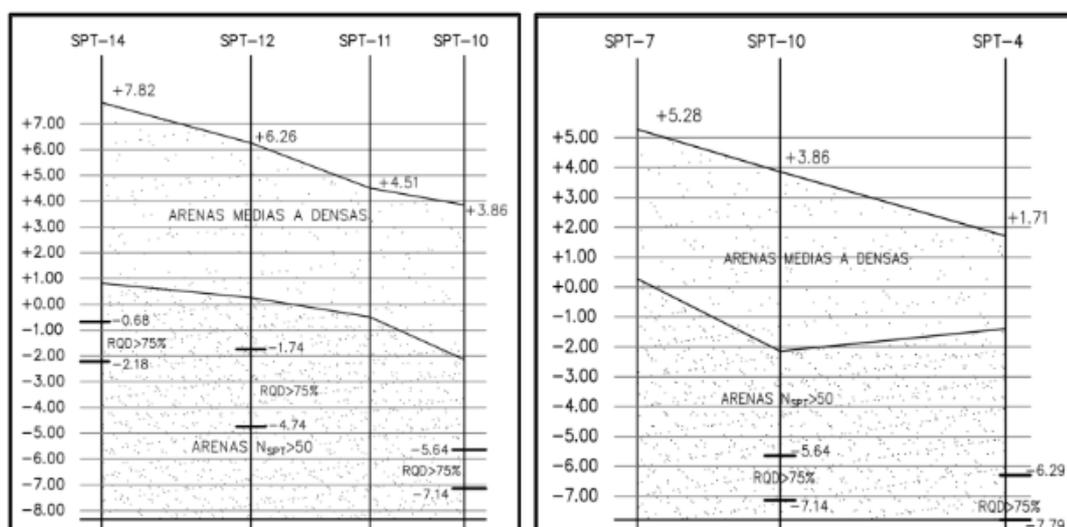


Figura 9: Perfil estratigráfico (izq.) y transversal (der.)

Fuente: Obras geotécnicas en el Paseo La Galería, Asunción, Paraguay (Arroyos, F. *et al.* 2015)

Caracterización mecánica

La resistencia en compresión no confinada de testigos del horizonte cementado presentó valores entre 440 a 640kPa. Los ensayos triaxiales en condición

consolidado – no drenado se efectuaron sobre muestras procedentes de sacatestigos a rotación en sondeos SPT.

Este proyecto implicó un estudio detallado de cada posible solución debido a las condiciones difíciles en el terreno de fundación y a la importancia de la obra proyectada. La concepción y materialización del emprendimiento, demandó una gran cantidad de recursos humanos y tecnológicos para dar respuesta a los diferentes problemas geotécnicos presentados en los siete edificios proyectados.

Las obras geotécnicas realizadas incluyeron pilotes de hasta 15.5m de largo, con capacidades de carga de hasta 2.8MN, realizados en grupos de hasta seis pilotes. También fueron realizadas grandes plateas de fundación de 1125m² y 1.5m de espesor.

En una entrevista con el geólogo Marcos Fleitas, quien trabajó en el proyecto de construcción de las Torres del Paseo, comentó que para la ejecución del proyecto se llevó a cabo un rebatimiento del nivel freático, a fin de aumentar la estabilidad de las excavaciones y se realizaron obras de contención. En los sectores más comprometidos se fijaron pantallas de pilotes con vigas de coronamiento. Finalmente, se realizaron estudios de control durante y después de la ejecución de las fundaciones profundas para asegurarse de la correcta ejecución de las obras.

4.2.2 Edificio The Top



Figura 10: Imagen virtual Edificio The Top
Fuente: Diario ABC color (2019)

El edificio se encuentra sobre las Avenidas Aviadores del Chaco y López Moreira, según las coordenadas -25.285346, -57.569922.

De acuerdo al informe técnico (López, C., 2019), teniendo en cuenta el tipo de obra (edificio de quince plantas y dos subsuelos como se observa en la imagen virtual de la figura 10) y las dimensiones de la misma, se programaron cuatro sondeos a percusión, con realización de ensayos de penetración SPT en los suelos que sobreyacen al “rechazo”, e índices de Bosio N_B en los mismos, a cada metro o cambio de estrato, y recuperación de muestras para ensayos de rutina en laboratorio de quince metros lineales de profundidad por sondeo, perforándose un total de sesenta metros lineales y veintiochos centímetros (60.28 m).

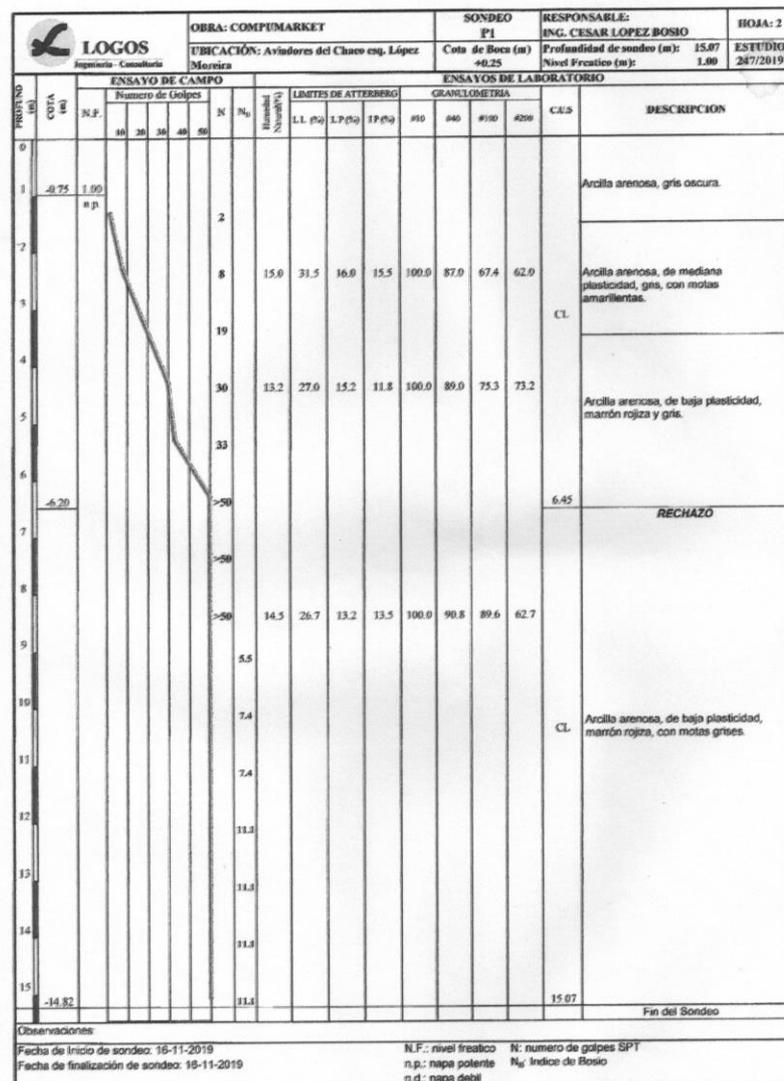


Figura 11: Resultados ensayos de campo (SPT) y de laboratorio

Fuente: Informe geotécnico (Lopez, 2019)

El perfil geológico está constituido fundamentalmente por suelos de “rechazo” formados por arcillas arenosas de baja plasticidad (CL) de consistencia muy dura y arenas arcillosas (SC) muy densa. Sobreyacen suelos arcillosos arenosos de mediana y baja plasticidad (CL) de consistencia muy blanda a muy dura y suelos areno arcillosos (SC) de densidad relativa medianamente densa a densa, en la figura 11 en la cual podemos apreciar los resultados de SPT, de laboratorio y clasificación de los estratos de uno de los pozos de exploración (López, C., 2019).

Teniendo en cuenta la presencia de acuíferos potentes superficiales, se realizó un rebatimiento del nivel freático, por debajo del nivel del fondo del segundo subsuelo para realizar la excavación en seco.

Se previó así mismo la captación del agua de infiltración por lluvias. Una vez realizado el rebatimiento del nivel freático, se procedió a la construcción del sistema de contención. Este sistema de contención se llevó a cabo por medio de una cortina perimetral de pilotes, observadas en la figura 12.



Figura 12: Pantalla de micropilotes de la obra
Fuente: (Ing. F. Mencia, comunicación personal, 13 de abril 2021).

4.2.3 Edificios The World Trade Center



Figura 13: Edificios del World Trade Center

Fuente: Google search

El obraje (figura 13) se encuentra sobre la Avenida Aviadores del Chaco, según las coordenadas geográficas -25.284861, -57.567104.

Para la realización de este proyecto se procedió a la excavación para fondo de 5^{to} subsuelo, hasta -17 metros. Se proyectó una pantalla de pilotines de 0,21 m de diámetro, separados unos de otros 0,85m y de longitudes variables entre 17 y 13 m de largo. Posteriormente se ejecutó un proyecto de depresión de la napa de agua, que se ubicaba originalmente al nivel de -4,00 m de profundidad (Leoni & Asociados, 2012).

De acuerdo con la entrevista al Ing. Germán Fretes (2021), a los 2 a 3 meses de bombeo se llegó al nivel necesario para realizar la excavación. Según estudios, es un suelo arenoso y desmoronable. Los procedimientos realizados fueron contención de suelo perimetral con pantalla de micropilotes, depresión del nivel freático y protección de fundaciones contra la agresividad del agua subyacente.

Para la excavación primero se construyó una pantalla perimetral de pilotes atirantados de 25 cm de diámetro colocados cada 90 cm que tenían vigas riostras cada 2,5 metros en vertical de 60x60 cm. Se realizaron atirantamiento con pilotes inclinados. Una vez fraguado se excavaron de a 2,5 metros hasta llegar a la cota de fundación. Los análisis de agua resultaron del tipo ácidas, de pH bajo, por lo que se establecieron protecciones a las fundaciones.

Las zapatas están recubiertas con una membrana asfáltica. En la parte inferior del edificio se realizó una losa de supresión de 60 cm de ancho. Al terminar las fundaciones se paró el bombeo y la napa freática volvió a su estado normal, generando una presión y empuje importante de forma lateral y vertical (Ing. G. Fretes, comunicación personal, 15 de abril 2021).

No se realizaron procesos de mejoramiento o acondicionamiento del suelo ya que la capacidad portante del suelo es de $4\text{kg}/\text{cm}^2$. Posteriormente se ejecutaron anclajes pasivos de longitudes variables y de 0,14 m de diámetro, ubicados en cinco filas horizontales que se vincularon con la pantalla de pilotines con vigas horizontales. Culminada la excavación se ejecutaron anclajes verticales para soportar el empuje hidrostático sobre la losa de fondo (Leoni & Asociados, 2012).

5. DISCUSIÓN

Existen problemas que pueden ocasionar las aguas subterráneas en diferentes tipos de obras, y también las soluciones más usuales que se utilizan para resolverlos. En el caso de cimentaciones, se pueden dar sifonamientos y necesidad de agotamiento de agua.

Gran número de obras requieren la excavación bajo el nivel freático para el apoyo de las cimentaciones, lo que precisa el abatimiento del nivel freático por debajo del fondo de la excavación, para poder realizar los trabajos de construcción.

Este es el caso de los edificios en análisis, que se encuentran cimentados en suelos con presencia de acuíferos superficiales. Los tres edificios vieron la necesidad de realizar un abatimiento del nivel freático por debajo del fondo de excavación, necesaria para la construcción. Asimismo, el método utilizado fue el de drenaje mediante pozos en los tres casos, los mismos estaban ubicados de manera estratégica por todo el terreno de la obra, de manera a realizar de forma segura la excavación y cimentación de las estructuras.

En el caso de los edificios del World Trade Center, a modo de contención de los efectos que pudieran producir las aguas subterráneas, se ejecutaron protecciones a las fundaciones como la colocación de una losa de supresión y el recubrimiento con una malla asfáltica.

En el edificio The Top, aún en construcción, a través de comunicaciones personales, comentaron que piensan mantener los pozos de drenaje y proseguir con el bombeo regular de aguas subterráneas.

Los tres edificios estudiados, posterior al abatimiento del nivel freático, fueron sujetos a la construcción de un sistema de contención, consistente en una cortina perimetral de pilotes con atirantamiento observados en la figura 14. Se especificaron soluciones particulares para cada sector de los proyectos, y en las zonas más comprometidas se ejecutaron pantallas de pilotes con vigas de coronamiento.



Figura 14: Pantalla de micropilotes de los edificios del World Trade Center
Fuente: World Trade Center Asunción (Leoni & Asociados, 2012)

Según los informes a los que se accedió, los edificios mencionados han sido construidos previendo los efectos negativos que pudieran ocasionar la presencia permanente de nivel freático en la supraestructura. Cabe destacar que estas técnicas de manejo de agua subterráneas en la zona de estudio son bastante conocidas y aplicadas a nivel capital, considerando zonas similares en la ciudad de Asunción, a tal punto que, es la solución más utilizada durante el proceso de ejecución de las fundaciones (el bombeo para generar el abatimiento), pero que cada edificación tiene diferencias en la solución post fundación (como el caso de pantallas de hormigón, losas de supresión, bombeo constante), teniendo en cuenta las características estructurales de las obras instaladas y los efectos medioambientales en los acuíferos afectados.

Esta técnica así como se explicó en el marco teórico, no debería generar efectos negativos ni estructurales o medioambientales si se siguen los procedimientos de ejecuciones de forma correcta, un caso que es mencionable de mala aplicación de

estas técnicas se dio en las obras de construcción del complejo edilicio “El Palacio de los Patos”, las cuales fueron suspendidas en el 2014 por incumplimiento disposiciones medioambientales suspendiendo temporalmente su licencia ambiental, al desviar un curso de agua subterránea encontrado en el lugar , demostrando que es de suma importancia que los conocimientos sobre estas técnicas y la aplicación correcta da beneficios desde el punto de vista de la seguridad en edificios, así como de la sostenibilidad de los recursos hidrogeológicos afectados.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

La técnica utilizada para el manejo de aguas subterráneas fue la realización de un abatimiento del nivel freático a través de pozos de bombeo, a fin de ejecutar las excavaciones de las obras, y se procedió a la construcción de sistemas de contención para posteriormente establecer las fundaciones de cada una de las edificaciones analizadas.

De acuerdo con los informes técnicos, teniendo en cuenta las características del sustrato, han tomado medidas a fin de evitar inestabilidad en las obras de construcción a futuro.

Las características geológicas en cada lugar estudiado presentan diferentes tipos de suelos y profundidades en relación con la roca consolidada, por lo cual se observa que no existe una uniformidad en el tipo de materiales en relación a sus despliegues.

6.2 Recomendaciones

Para llevar a cabo un planteamiento de técnicas de manejo de aguas subterráneas en las que se requiera rebajar el nivel freático para la construcción o excavación del terreno es importante la realización de una caracterización hidrogeológica adecuada.

Con respecto a las inundaciones, específicamente en la zona de estudio, es importante la implementación de un sistema de monitoreo del nivel freático de los pozos de bombeo, y un control estructural regular de las fundaciones.

Posterior a la culminación de las obras, continuar con el bombeo de los pozos de extracción de agua para reducir la presión y efectos ejercidos sobre las fundaciones de las obras.

ANEXOS

Anexos A. Fotografías de avances de obras del edificio The Top.



A 1. Inicio de obras

Fuente: Proveídas por la Ing. Rosana Parodi

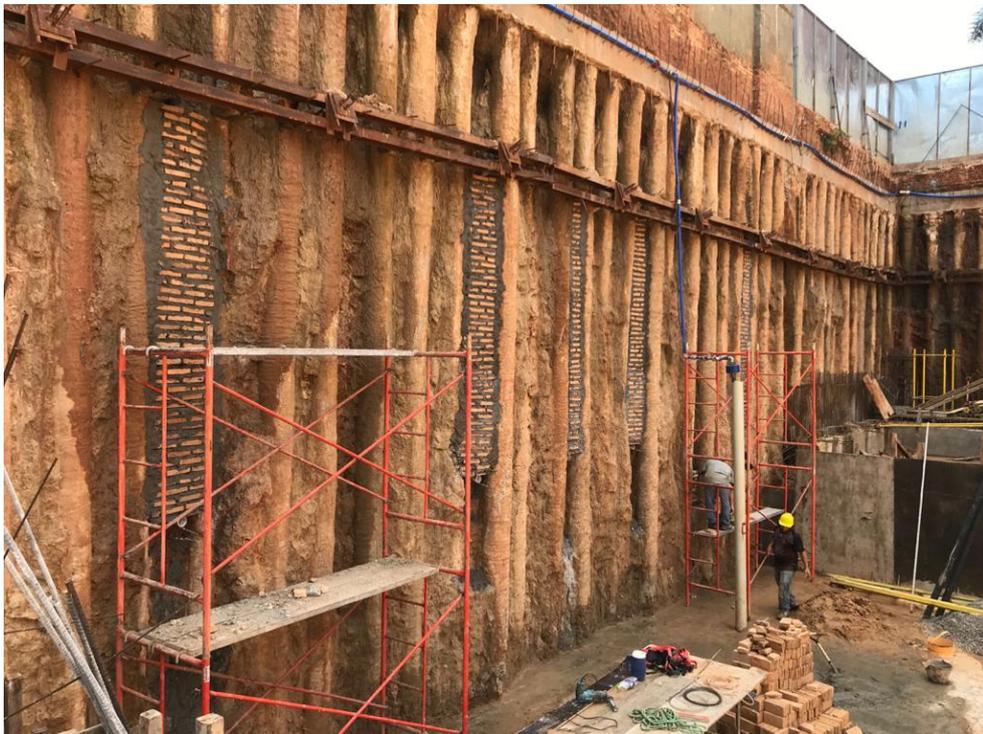


A 2. Pantallas de micropilotes

Fuente: Proveídas por la Ing. Rosana Parodi



A 3. Agua de lluvia acumulada
Fuente: Proveídas por la Ing. Rosana Parodi



A 4. Relleno de los espacios entre los pilotes
Fuente: Proveídas por la Ing. Rosana Parodi



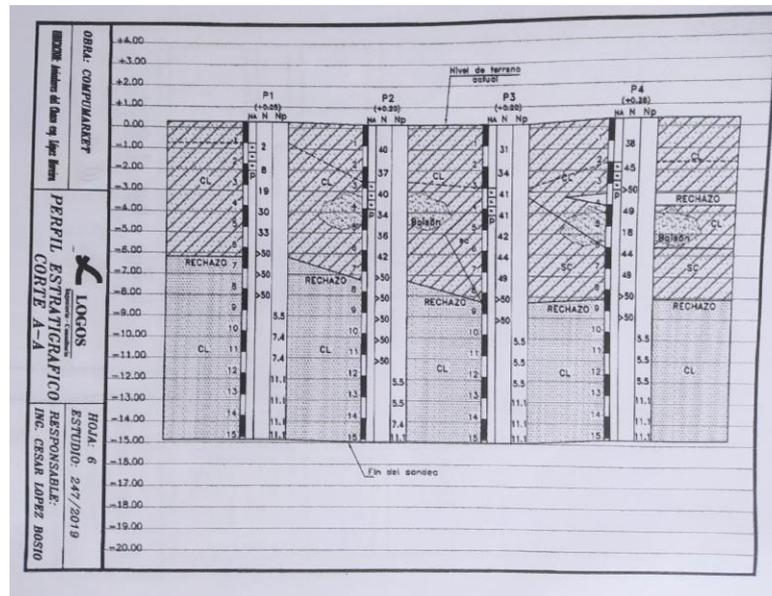
A 5. Avances en la construcción del 1er nivel del subsuelo.

Fuente: Proveídas por la Ing. Rosana Parodi



A 6. Avances en la construcción del 2do nivel del subsuelo.

Fuente: Proveídas por la Ing. Rosana Parodi



A 7. Perfil estratigráfico

Fuente: Estudio geotécnico para edificio en altura (López, 2019)

A8. Diseño de entrevista a profesionales del rubro de la geología e ingeniería

1. ¿En qué proyecto de obra civil en la zona del Barrio Ycuá Satí de Asunción trabajó?
2. ¿Se hicieron análisis del suelo previo a las construcciones?
3. ¿Cuántos pozos de exploración se realizaron?
4. ¿Cuáles fueron los resultados en cuanto al nivel freático?
5. ¿Qué técnicas de manejo de aguas subterráneas implementaron?
6. ¿Se realizó algún procedimiento de mejoramiento de suelo en el área de trabajo?
7. ¿Utilizaron métodos de contención como muros o parecidos?
8. ¿Experimentaron inconvenientes al momento de la excavación?
9. En cuanto a la construcción de las fundaciones ¿Se utilizó algún método de protección frente a los efectos de la presencia de aguas subterráneas?
10. En cuanto al agua extraída a través de los pozos de bombeo ¿Hay un plan o proyecto para la utilización de esa agua?
11. ¿Existe un plan de monitoreo de las fundaciones a largo plazo?

Fuente: Elaboración propia

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFAGEME, F., ERASO, A., LAGUNA, L. & NAVARRO, A. *La hidrogeología como tecnología de apoyo en la ingeniería civil*. Instituto Tecnológico GeoMinero. España. Disponibles en: http://www.xeologosdelmundo.org/wp-content/uploads/2020/08/hidrogeologia.apoyo_ingeneria.civil.pdf
- ARROYO, F., CALVENTE, R., CODEVILLA, M., HERNÁNDEZ, J., LOPEZ, A., RELLÁN, G. & SFRISO, A. (2015). *Obras geotécnicas en el Paseo La Galería, Asunción, Paraguay*. XV Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Buenos Aires. Argentina. Disponible en: <https://www.srk.com/es/publicaciones/obras-geotecnicas-en-el-paseo-la-galeria-asuncion-paraguay>
- BOSIO, J. (2007). *Características geotécnicas del Firme de Asunción*. Disponible en: <https://geologiadelparaguay.com.py/Caracteristicas-Geotecnicas-del-firme-de-Asuncion.pdf>
- BOSIO, J. & LOPEZ, C. (2007). *Utilidad de los pozos de prueba en el estudio de macizos de arenas cementadas*. 1er Congreso de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de Asunción. Disponible en: <http://www.ing.una.py/pdf/1er-congreso-nacional-ingcivil/64ge-64.pdf>
- CASTILLO, A. (2005). *Relación de la Geología y la Hidrogeología*. 1er Congreso Paraguayo de Recursos Hídricos. Hernandarias. Paraguay.
- CUSTODIO, E. & LLAMAS, R. (1983). *Hidrología subterránea*. Barcelona. España. Ediciones Omega S.A.

- DIARIO ABC COLOR (2019). *Sumarán otro edificio de oficinas en el eje corporativo*. Economía. Disponible en: <https://www.abc.com.py/edicion-impresa/economia/sumaran-otro-edificio-de-oficinas-en-el-eje-corporativo-1822195.html>
- FERRER, A. & CASSIRAGA, E. (2008). *Control de las aguas subterráneas en la construcción*. Universidad Politécnica de Valencia. España. Disponible en: https://www.ferrersl.com/wp_content/uploads/2017/02/Ponencia_INGENIER%C3%8DA-GEOL%C3%93GICO-AMBIENTAL_Control-de-las-aguas-subterr%C3%A1neas-en-la-construcci%C3%B3n.pdf
- FERRER, A. (2010). *Control de las aguas subterráneas en la Ingeniería Civil, interacción entre la obra y el medio hidrogeológico, síntesis de métodos de control y aplicación de modelos matemáticos*. Universidad Politécnica de Valencia. España. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/14198>
- GADEA, M. (2017). *Determinación de los niveles de salinidad del acuífero Patiño*. Tesis de Maestría en Hidrogeología. Universidad Nacional de Asunción. Paraguay. Disponible en: <https://www.geologiadelparaguay.com.py/tesisMAGV.pdf>
- Geología-Publicaciones. (2019). *Clasificación de suelos*. Disponible en: <https://post.geoxnet.com/clasificacion-de-suelos/>
- Geotecnia Fácil. (2020). *Determinación de límites de Atterberg*. Disponible en: <https://geotecniafacil.com/limites-de-atterberg/>
- GÓMEZ, D. (1991). *Consideraciones morfoestructurales y estratigráficas de la Antiforma de Asunción y su relación con la exploración de aguas subterráneas*. 1er Simposio sobre aguas subterráneas y perforación de pozos en el Paraguay. Asunción. Paraguay.
- HERNÁNDEZ, R., FERNÁNDEZ, C. & BAPTISTA, M. (2014). *Metodología de la Investigación*. 6ta. Edición. McGraw-Hill. México.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (INE) (2021). *Proyección de la población por sexo y edad, 2021*.

Disponible en: <https://www.ine.gov.py/news/news-contenido.php?cod-news=595#:~:text=Asunci%C3%B3n,la%20poblaci%C3%B3n%20total%20del%20pa%C3%ADs>.

LEONI & ASOCIADOS (2012). *World Trade Center Asunción*. Asunción. Paraguay. Disponible en: <https://ingenieroleoni.com/obras/world-trade-center-asuncion/>

LOPEZ, C. (2019). *Estudio geotécnico para edificio en altura – edificio Compumarket – Asunción* (Informe Nro. 247/19). Asunción. LOGOS S.R.L.

LÓPEZ, O., GONZÁLEZ, E., DE LLAMAS, P., MOLINAS, A., FRNACO, E., GRACÍA, S. & RÍOS, E. (1995). *Estudio de reconocimiento de suelos, capacidad de uso de la tierra y propuesta de ordenamiento territorial preliminar de la Región Oriental del Paraguay*. Proyecto de racionalización del uso de la tierra. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Asunción. Paraguay.

PROYECTO PAR83/005.1986. *Mapa Geológico de la República del Paraguay. Escala 1:1.000.000*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Ministerio de Defensa Nacional. Asunción, Paraguay.

RAMIREZ, L., FRANCO, R., GOMEZ R., CANTERO N., AMÁBILE, L., LUGO L., (2007). *Carta Geotécnica de la Ciudad de Asunción*. 1er Congreso de Ingeniería civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de Asunción. Disponible en: <http://www.ing.una.py/pdf/1er-congreso-nacional-ingcivil/28ge-28.pdf>

TARBUCK, E., LUTGENS, F. & TASA, D. (2005). *Ciencias de la Tierra*. 8va. Edición. Pearson Educación S. A. Madrid. España