

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

P. patrocinante: Carmen González Labbé.

**“Elaboración de zonificación y
estratificación de los suelos de la comuna
de San Pedro de la Paz”**

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para
obtener el título de Ingeniero Civil.

MATEU MAGLIA ESPINÀS.

Concepción, Julio del 2019

DEDICATORIA

Dedicado a todas las chilenas y chilenos que se han cruzado en mi camino en estos buenos meses que he pasado aquí.

ELABORACIÓN DE ESTRATIFICACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LOS SUELOS EN LA COMUNA DE SAN PEDRO DE LA PAZ

Mateu Maglia Espinàs

**Estudiante del departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío
y UPC**

mateumaglia@gmail.com

Carmen González Labbé

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío

cgonzal@ubiobio.cl

RESUMEN

En este trabajo se realiza un estudio sobre la estratificación y zonificación de la comuna de San Pedro de la Paz acorde con la normativa fijada en el Decreto Supremo N°61 (2 de noviembre del 2011). El estudio se ha realizado con 109 sondeos obtenidos de empresas de análisis de suelo. La información resultante del estudio se proporciona para ser consultada fácilmente con ArcMap y actualizable a medida que se realicen nuevos sondeos profundos.

La información ha sido organizada en dos planos diferenciados. El primero contiene información del material, estratificación del suelo y valores de SPT y Vs30 para cada zona que se ha considerado y el segundo dispone de las zonas clasificadas según su categoría sísmica definida por la normativa vigente a fecha de realización del estudio.

Una vez obtenida toda esta información se hace un análisis comparativo con el plan regulador para ver si éste se corresponde y facilita la aplicación de los criterios técnicos referentes a la normativa sísmica de suelos y, en caso de no ser así, se propone una modificación. Para tener una visión más clara de la viabilidad de construcción se proponen criterios básicos de fundación en cada zona.

Palabras clave: zonificación, estratificación, San Pedro de la Paz, plan comunal.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	3
2. OBJETIVOS.....	4
2.1 Objetivo General.....	4
2.2 Objetivos Específicos	4
3. ANTECEDENTES GENERALES	5
3.1 Geografía y demografía.....	5
3.2 Hidrografía.....	5
3.3 Antecedentes Geomorfológicos.....	6
3.4 Antecedentes Sísmicos	8
3.5 Estudios previos.....	9
4. METODOLOGÍA	10
4.1 Recopilación de la Información.....	11
4.2 Creación de la base de datos.....	12
4.3 Creación de la zonificación y estratificación.....	12
4.4 Implementación de la normativa y nueva zonificación	13
4.5 Comparativa del plan regulador con la zonificación	14
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	16
6. CONCLUSIONES.....	23
7. RECOMENDACIONES PARA FUTURAS ACTUALIZACIONES	24
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

1. INTRODUCCIÓN

La comuna de San Pedro de la Paz, perteneciente a la región Chilena del Biobío, ha sufrido a lo largo de los años los efectos devastadores de fenómenos sísmicos. Estos son comunes en el país y especialmente en la zona central, produciendo destrozos materiales y pérdidas humanas. El último gran terremoto se produjo en 2010 y en San Pedro de la Paz tuvo una afectación notable.

Para poder conocer en profundidad los efectos de futuros terremotos la comprensión de los suelos sobre los que se construye (composición, características y comportamiento sísmico) es de vital importancia y en base a esto surge el interés realizar un estudio de la zonificación y estratificación de los suelos de la comuna. Los planos resultantes han de estar sujetos a la normativa vigente en el país y esta cambió como consecuencia del gran terremoto del 27 de febrero de 2010. Los estándares de diseño sísmico se re especificaron y fruto de esto obtenemos el Decreto Supremo 61 (D.S. 619)

Los últimos estudios de zonificación y estratificación de la zona datan de 2004 y, por lo tanto, posteriores a la nueva normativa impuesta por el Decreto Supremo 61 (2011). Es por eso que surge la clara necesidad de un nuevo estudio acorde a la normativa vigente.

Esta información técnica ha de ir de la mano con las políticas urbanísticas comunales para facilitar su aplicación y respeto y es por eso que este trabajo también busca encontrar las posibles relaciones entre el plan regulador de la comuna y los planos obtenidos.

Los datos demográficos de San Pedro de la Paz indican que, con un 13% de la población de la zona conocida como Gran Concepción, San Pedro de la Paz tiene 131808 habitantes. Además, San Pedro de la Paz está experimentando un aumento de las actividades inmobiliarias bastante notable, con un aumento del 36,4% de construcción de viviendas en los últimos diez años. Todo esto, según los censos de Población y Vivienda llevados a cabo por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE) y las fichas comunales elaboradas por el SECPLA de San Pedro de la Paz. Este estudio, especialmente la comparación con el plan comunal, dará una información interesante para poder ordenar y guiar de forma correcta este crecimiento.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Elaborar una zonificación y estratificación de los suelos de la comuna de San Pedro de la Paz de acuerdo con lo dispuesto en el decreto n°61 de 2011 y establecer su vínculo con el plan regulador de la comuna.

2.2 Objetivos Específicos

- Crear una base de datos digital de todos los sondeos existentes mediante ArcView.
- Crear un plano de la zonificación y estratificación de los suelos mediante Arcview.
- Crear un plano de la zonificación de la comuna mediante ArcView que represente la normativa sísmica actual.
- Estudiar vínculo entre la zonificación y el Plan Regulador de San Pedro de la Paz.

3. ANTECEDENTES GENERALES

3.1 Geografía y demografía

San Pedro de la Paz es una ciudad ubicada en la Región de Chilena del Biobío, en la provincia de Concepción. Limítrofe con la ciudad de Concepción forma parte del área metropolitana denominada como Gran Concepción. Limita con el Río Biobío al Este y Norte, con el océano Pacífico al Oeste y Coronel al Sur.

Hoy en día tiene 131808 habitantes, un 13% de Gran Concepción, y su población ha aumentado cerca del 19% en los últimos diez años. El crecimiento de la ciudad es innegable y también se puede observar en el crecimiento de la construcción de viviendas, que se ha incrementado en un 36,4% en los últimos diez años. Según los censos de Población y Vivienda llevados a cabo por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE) y las fichas comunales elaboradas por el SECPLA de San Pedro de la Paz.



Ilustración 1: ubicación de San Pedro de la Paz.

Fuente: elaboración propia

3.2 Hidrografía

La comuna de San Pedro limita con el río Biobío, uno de los más caudalosos de Chile, con un caudal medio de $899 \text{ m}^3/\text{s}$ según estudios realizados por la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas del Gobierno de Chile.

También son de una importancia relevante las dos lagunas que se encuentran dentro de la Comuna, la laguna Grande y Chica de San Pedro, así como los dos humedales adyacentes a las lagunas.

La comuna tiene 12km de costa con el océano Pacífico, que condiciona su clima y la ciudad en todos sus aspectos.

3.3 Antecedentes Geomorfológicos

A continuación, podemos observar un plano que define la geología de la comuna de San Pedro de la Paz y una breve descripción de sus componentes.

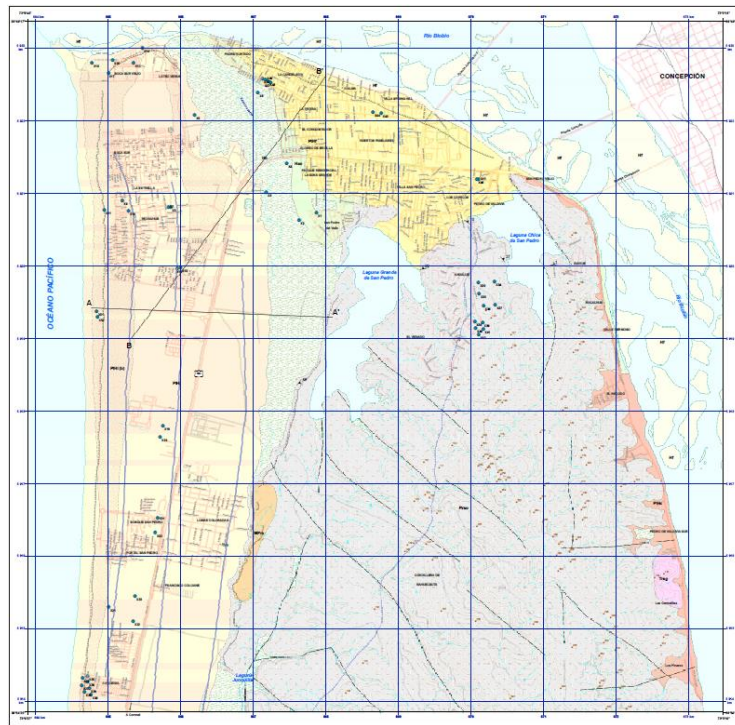


Ilustración 2: mapa geológico de San Pedro de la Paz

Fuente: SERNAGEOMIN


Depósitos antrópicos (Holoceno)

Depósitos de composición y espesor muy variables. Contienen, entre otros materiales, arenas, limos, arcillas, escombros de construcción, residuos sólidos domiciliarios, restos orgánicos y escorias de fundición. Los espesores varían entre 1 y 12m en algunos terraplenes de calles y puentes. La profundidad del nivel freático varía entre 0 y 5 m.s.n.m.


Humedales (Holoceno)

Depósitos de ciénagas y planicies de inundación fluvial reciente, de hasta 3 m de espesor que sobre yacen tanto a sedimentos fluviales actuales como antiguos del río Bío Bío. Corresponden


a arcillas, limos y arenas finas a muy finas, con alto contenido de materia orgánica, originados por obturación del drenaje en zonas topográficamente deprimidas, cerradas por cordones litorales y dunas. La profundidad del nivel de agua subterránea es entre 0 y 1,5 m.s.n.m.

Depósitos fluviales actuales (Holoceno) 


Arenas de muy finas a gruesas, con escaso a mediano contenido de limos y/o arcillas, presenta capas con gravas subordinadas y densidades bajas a medias. Forman los actuales depósitos aterrazados y las barras de arena que modelan la vaguada del río Bío Bío. En general, corresponde a depósitos saturados de agua, con bajo grado de compactación.

Depósitos aluviales y coluviales (Pleistoceno-Holoceno) 

Bloques, gravas y arenas finas a medias, sin cementación y con alto contenido de limos y arcillas. Estos depósitos están interdigitados con las arenas del río Bío Bío.

Depósitos fluviales antiguos (Pleistoceno-Holoceno) 

Arenas, desde muy fina a gruesa, con escaso limo, sin plasticidad, de buena selección, subredondeadas, de origen volcánico y composición predominantemente andesítica-basáltica; se presentan interstratificadas con depósitos coluviales, en el pie de laderas. La profundidad del nivel de agua subterránea en los sondajes analizados es superior a los 5m.s.n.m.

Depósitos litorales y eólicos (Pleistoceno-Holoceno) 

Arenas de grano medio a fino, color gris oscuro, con bajo contenido de limos, con presencias de cuarzo y micas. Compacidad suelta a media, a menos de 10 m de profundidad y compacta a muy compacta, bajo los 10 m. En la superficie, estos depósitos presentan cordones litorales paralelos a la línea de costa, correspondientes a antiguas líneas de costa, los cuales han sido modificados y destruidos por intervención antrópica. b) Depósitos eólicos de dunas activas parcialmente destruidos.

Estratos Molino del Sol (Mioceno-Plioceno) (Mendoza, 2001) 

Depósitos semi consolidados, altamente meteorizados y erosionados. Están formados por arenas silíceas de color pardo amarillento a rojizo, de origen marino, con contenidos variables de arcillas, depositadas en discordancia angular sobre rocas del basamento metamórfico (Pzso). Constituyen un paleoborde costero, evidenciado por un escarpe de erosión.

Granodiorita Las Carmelitas (Triásico Superior) 

Granodioritas y tonalitas de grano fino a medio, con diques dacíticos y aplíticos. Presenta meteorización avanzada en la superficie.

Basamento Metamórfico, Serie Oriental (Paleozoico Superior)



Esquistos, filitas, pizarras y metasedimentitas, resultado de un metamorfismo de baja presión y alta temperatura. Son rocas intensamente deformadas y plegadas. Constituyen la roca basal sobre la cual se han depositado las demás unidades geológicas descritas.

3.4 Antecedentes Sísmicos

San Pedro de la Paz se encuentra en una de las regiones más sísmicas de Chile. El último terremoto de gran intensidad fue el 27 de febrero de 2010 (magnitud 8.8 Richter).

La mayoría de los sismos que ocurren en el territorio chileno, se deben a la subducción de la placa de Nazca (Océánica) sobre la placa Sudamericana (Continental). Cada placa tiene un sentido de movimiento opuesto. La placa de Nazca se mueve hacia el Este, y la Sudamericana al Oeste. También puede ocasionar terremotos la rotura de una de las placas, habitualmente la de Nazca.

La figura 2 muestra los principales sismos de gran magnitud ocurridos en la región en el último siglo:

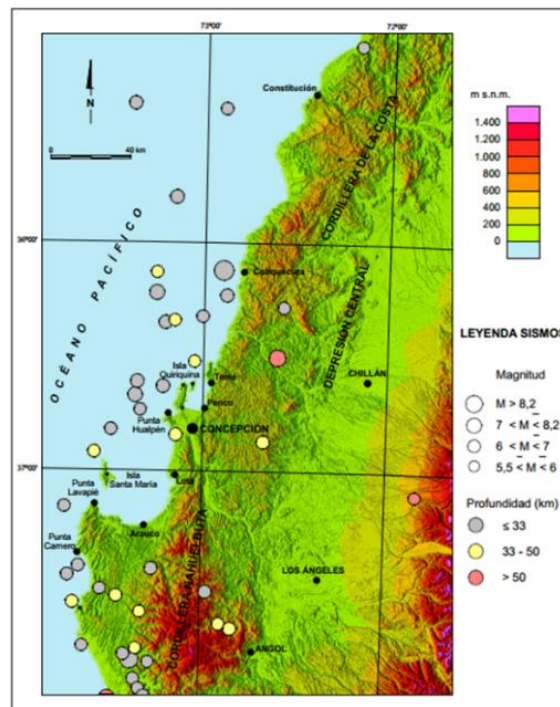


Ilustración 3: Principales sismos en la Región del Biobío
Fuente: Vivallos, J. et al (2010)

3.5 Estudios previos.

Uno de los principales documentos utilizado para obtener una visión general de la comuna en lo referente a información geológica y microzonificación sísmica ha sido el plano publicado en el 2012, importante por ser post terremoto de 2010, por el SERNAGEOMIN. De este, se ha extraído información referente a la tipología, formación y cronología de los suelos de la comuna, así como los antecedentes sísmicos. También ha aportado una primera visión general de la profundidad a la que se encuentran los afloramientos rocosos y suelos de buenas características constructivas a partir de puntos donde se nos indican los períodos predominantes de los registros de micro vibraciones realizados.

También se han revisado múltiples documentos de carácter más académico para poder definir y escoger bien los procedimientos y métodos a utilizar. Del documento *SPT-based liquefaction triggering procedures* (Idriss, I.M. y Boulanger, R.W., 2010) se ha obtenido el método para determinar los fenómenos de licuación. De *Análisis de correlaciones existentes entre ensayo SPT y ondas de corte, para sectores en estudio* (González, G., 2011) se ha podido estudiar los diversos métodos que se pueden utilizar para acabar de completar cierta información. Otros documentos que se han consultado pueden verse resumidos en la siguiente tabla:

Documento	Idea 1	Idea 2
<i>Comparación entre la metodología para evaluar el potencial de riesgo de licuefacción y los catastros realizados luego del terremoto de 2010 en Concepción</i> , (Alfaro, F.A., 2010)	En la mayoría de casos, el potencial riesgo de licuación no aumenta con la magnitud del sismo, sino que dicho riesgo depende mucho más de la tipología y características estratigráficas del suelo.	Solo con realizar el análisis de licuación para una magnitud determinada ya estamos trabajando con un margen aceptable.
<i>Evaluation of Liquefaction Potential from SPT and CPT</i> (Mominul, M., 2017)	En estudios realizados en India, en lecho fluvial con limos, arcillas y arenas se ve que la estimación del factor de licuación tiende a	Necesidad de un control riguroso a la hora de realizar ensayos si estos han de servir para la estimación de FS.

	sobreestimarse con ensayo SPT ya que ensayo CPT aporta factores menores.	
<i>Use of SPT Blow Counts to Estimate Shear Strength Properties of Soils: Energy Balance Approach</i> (Hettiarachchi, H. y Brown, T., 2009)	Posibles correlaciones entre SPT, s_u y q_u .	
<i>Ensayo SPT</i> (Sfriso, A. O., 2015)	Descripción general ensayos SPT.	Posibles correlaciones SPT con otras propiedades.
<i>Standard Penetration Test: Corrections and Correlations</i> (Rahman, M. 2014)	Factores de corrección para ensayos SPT.	

Tabla 1: revisión bibliográfica previa
Fuente: elaboración propia

Existen diversos trabajos relacionados con la zonificación y estratificación en la zona del Biobío, pero referidos a otras comunas como Concepción, Hualpén, Penco o Talcahuano. Todos estos estudios basan su metodología en un estudio realizado en el 2004 por Inostroza sobre la ciudad de Concepción. En este trabajo se intenta no seguir exactamente dichas metodologías por no adaptarse exactamente al entendimiento del autor y voluntad de este de realizar un trabajo siguiendo sus propios métodos, intentando aportar algo distinto a los trabajos de zonificación y estratificación que se han realizado en la Universidad del Bío-Bío.

4. METODOLOGÍA

El primer paso a realizar para garantizar la claridad del estudio es definir el marco espacial y temporal de los datos. El marco espacial se ha fijado como todo el terreno que se incluye dentro de las fronteras administrativas de la comuna de San Pedro de la Paz, ya que dentro de estas es donde se define el Plan Director Comunal y se puede realizar la comparativa. El marco temporal, comprende toda la información disponible priorizando la de 2011 en adelante por ser la más acorde con la normativa vigente.

Con los marcos definidos, el estudio realizado sobre los documentos citados en el punto 3.5 y otros en menor medida comprendidos en la bibliografía general, se adopta la siguiente metodología para abordar los objetivos planteados de forma correcta, concisa y ordenada:

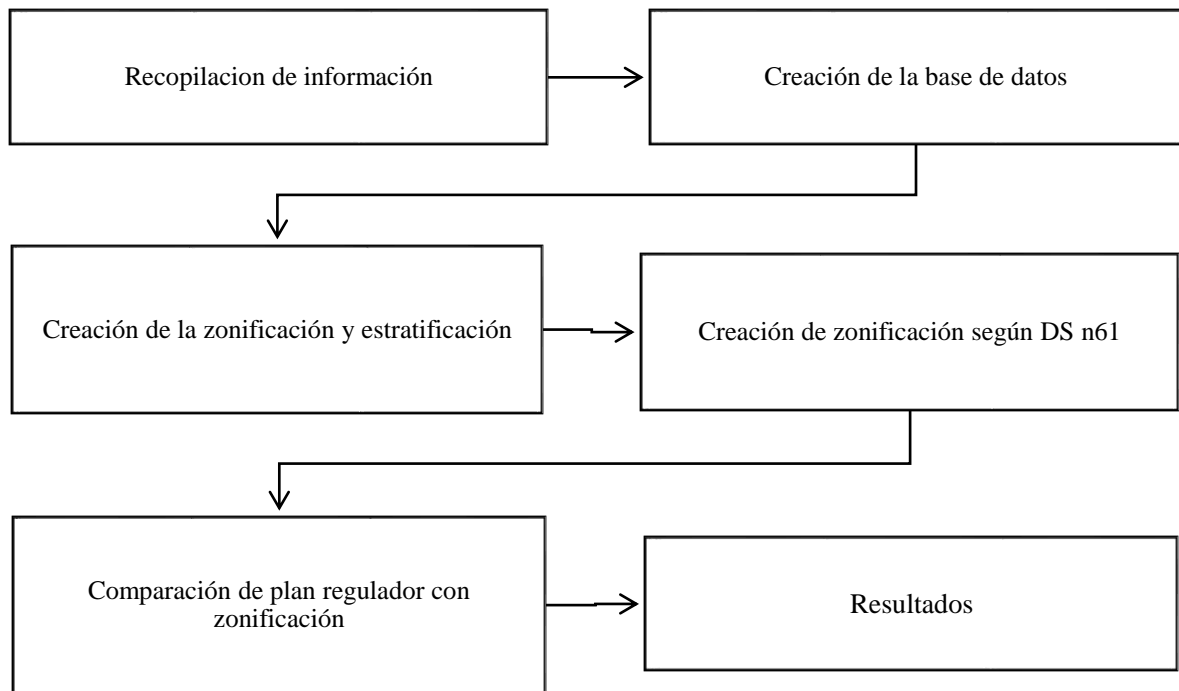


Tabla 2: esquema de metodología
Fuente: elaboración propia

A continuación, se definen los distintos pasos a seguir según la metodología escogida.

4.1 Recopilación de la Información

Para realizar el trabajo, se debe obtener información referente a sondeos profundos. Estos deben ser, preferiblemente, de 2011 en adelante ya que serán los que darán información más relevante para la aplicación de la normativa actual que define el Decreto 61, la cual exige sondeos de hasta 30m. Los sondeos más antiguos y actuales pero de menor profundidad, igual serán útiles ya que proporcionarán información complementaria de las capas superiores.

La información necesaria para cada sondeo será: ubicación geográfica, fecha de realización, profundidad de la napa, estratificación, propiedades de los estratos y ensayo SPT y Vs30 en el mayor número posible.

Debido al costo, dificultades y gran cantidad de tiempo necesarios para realizar un gran número de ensayos en el terreno a estudiar, dicha información será requerida a empresas de ingeniería de suelos y otras instituciones públicas como la municipalidad de San Pedro o la Universidad del Bío-Bío.

4.2 Creación de la base de datos

La base de datos se ha realizado mediante herramientas SIG. En este caso se ha usado ArcMap® de Esri® en la versión 10.5.

En la tabla encontramos todos los sondeos con su información de localización, fecha, napa, estratigrafía y ensayo SPT y Vs30 en los que dispongan de ello. En el archivo realizado con el sistema de información geográfica se encuentran los mismos sondeos que en la tabla, pero para ser vistos en terreno. Esta segunda opción, no dispone de ensayo SPT y Vs30 visibles, pero se proporciona un número de referencia para poder consultarlo en la tabla.

Se encuentra una descripción más detallada de todas las operaciones definidas anteriormente en el Anexo 1.

4.3 Creación de la zonificación y estratificación

Al igual que la base de datos, la estratificación y zonificación se realizará mediante, y para ser consultada, con una herramienta SIG. En este caso, también se ha usado ArcMap® de Esri® en la versión 10.5. También se usará el programa Civil3D® de Autodesk® en la versión 2017 para realizar operaciones gráficas que escapan a las utilidades de ArcMap®.

Antes que nada, se deben agrupar los sondeos que tengan características estratigráficas similares. Para realizarlo, se separarán los sondeos por tipo de granulometrías del suelo (arenas, gravas...) luego por la tipología de dichos suelos (limos, arcillas...), por afinidad de espesores de capa y finalmente por ubicación. De esta manera se consiguen agrupar no solo los sondeos por afinidad en el tipo de suelos, sino que tendrán espesores de capa y orden de estratigrafía similar. Para realizarlo, se recurre, en primera instancia, a herramientas del programa, y una segunda operación manual de agrupación para acabar de afinar las selecciones y generar grupos de puntos correctamente.

Una vez se tienen todos los puntos en distintos grupos se procede a la delimitación de las zonas de influencia de dichos puntos. Esto se realizará mediante influencias radiales de misma magnitud en todos los puntos, dando así un peso equitativo a todos los sondeos. La información referente a influencia de los sondeos no ha sido proporcionada por las empresas que han aportado información y es por eso que se ha adoptado la simplificación anterior. Para las intersecciones entre las zonas de influencia se realizarán las fronteras adoptando como tales las resultantes de los polígonos de Thiessen entre todos los puntos para garantizar la equidad entre sondeos. Usando los polígonos de Thiessen se asegura que la frontera entre zonas de influencia de dos puntos sea equidistante a ambos.

Habiendo realizado todas estas operaciones disponemos de un primer plano de zonificación, pero se ve demasiado regular y geométrico y puede que existan zonas que no representen bien la realidad. Es por eso que se realizará un ajuste manual del plano usando Civil3D®.

Con estas operaciones se tienen ya definidas espacialmente todas las zonas y se deben definir las propiedades de los suelos de las zonas. Para ello se debe estudiar zona por zona y establecer una estratigrafía, un ensayo SPT y una velocidad de onda corta representativas de cada zona. Esto se realizará mediante el estudio de los sondeos por cada zona. Según su posición en terreno, se interpolarán sus estratigrafías, y se adoptará un SPT representativo de esta con la media de todos los ensayos SPT que contiene la zona. Lo mismo se efectuará con los ensayos de Vs30.

La información disponible de estudios geofísicos en la zona es más bien baja y por ese motivo se deberá encontrar un método para obtener las velocidades de onda de corte en los suelos que nos interesan. Diversos autores han trabajado para poder relacionar otras propiedades de los suelos con las velocidades transversales. Estas correlaciones, especialmente entre SPT y Vs30, han sido ampliamente estudiadas por investigadores de alrededor del mundo, pero al tratarse de correlaciones empíricas válidas para ciertos lugares, hace falta un estudio comparativo para ver su adecuación en los suelos de la zona de San Pedro.

Un estudio realizado por Gonzáles, G. en el año 2011 titulado *Análisis de correlaciones existentes entre Ensayo SPT y Ondas de corte, para sectores en estudio* será de ayuda para definir la correlación que más pueda encajar en los suelos de nuestro estudio. El análisis de este estudio y los resultados que se extraen de él se pueden encontrar en el Anexo 3.

Se debe tener en cuenta que este estudio ha dado preferencia a los ensayos de onda de corte hechos en terreno y solo se ha aplicado la correlación escogida en las zonas donde no existía información empírica alguna.

Nota: se encuentra una descripción más precisa de las operaciones de software en el Anexo 1.

4.4 Implementación de la normativa y nueva zonificación

El Decreto Supremo N°61 se elabora el año 2011 para redefinir lo establecido en sus normativas precedentes: la NCh433 y sus modificaciones, el Decreto Supremo N°117, etc. Su objetivo será redefinir los estándares en lo que se refiere a los suelos para el diseño sísmico.

Los conocimientos teóricos adquiridos en los últimos dos siglos y la experiencia empírica que se ha ido acumulando definen como suelos con mejor comportamiento frente sismos los de predominante carácter rocoso y de peor comportamiento los suelos con un alto contenido de finos y en estado blando. Por esa razón el Decreto Supremo N °61 divide los suelos en una gradación compuesta por seis tipos. Los de mejor comportamiento serán definidos como de tipo A y los de peor como F que ya serán definidos como suelos de características especiales por poder presentar fenómenos de licuación y alto contenido orgánico entre otros.

Suelo Tipo		V _{s30} (m/s)	RQD	q _u (MPa)	(N ₁) (golpes/pie)	S _u (MPa)
A	Roca, suelo cementado	≥ 900	≥ 50%	≥ 10 (ε _{qu} ≤ 2%)		
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	≥ 500		≥ 0,40 (ε _{qu} ≤ 2%)	≥ 50	
C	Suelo denso o firme	≥ 350		≥ 0,30 (ε _{qu} ≤ 2%)	≥ 40	
D	Suelo medianamente denso, o firme	≥ 180			≥ 30	≥ 0,05
E	Suelo de compactidad, o consistencia mediana	< 180			≥ 20	< 0,05
F	Suelos Especiales	*	*	*	*	*

Tabla 3: clasificación según la normativa vigente
Fuente: DS n61

Para realizar dicha definición de suelos la normativa se basa en la definición de rangos en los parámetros geotécnicos más representativos. En la tabla 1 se presenta la clasificación y sus distintos rangos.

Nota: se encuentra una descripción más precisa de las operaciones de software en el Anexo 1 y una extracción de la normativa en el Anexo 4.

4.5 Comparativa del plan regulador con la zonificación

En este apartado se comparará de forma visual la disposición de las zonas definidas en el Plan Regulador de San Pedro de la Paz con la zonificación obtenida en el apartado 4.4. La información se introducirá en una tabla con tres columnas. Una para la disposición inicial del plan regulador, otra para la disposición resultante de los estudios realizados y una tercera con recomendaciones de modificación del plan regulador si fueran necesarias.

Además, se añadirá una cuarta columna con recomendaciones de fundación para poder dar una idea de la complejidad constructiva de la zona y así poder ahondar más en el estudio de que edificios serán más o menos fáciles de construir en cada una de ellas.

Para realizar las recomendaciones de fundación, el principal problema lo encontramos en los estratos que son licuables. Para abordar este problema lo haremos mediante el código ACI ya que es el más usado en Chile y el que propone un método de resolución que tiende más a la realización de modificaciones solo si es estrictamente necesario.

El primer paso que se realiza consiste en ver si la capa con potencial de licuefacción, si lo hiciera, afectaría a la estructura. Para ello se recurre a un estudio empírico realizado por Ishihara (1985). En la siguiente Ilustración 5 podemos ver el resultado final de dicho estudio que relaciona espesor de capa licuable con el espesor de la capa por encima de esta según la a_{max} definida (0,4g en este estudio).

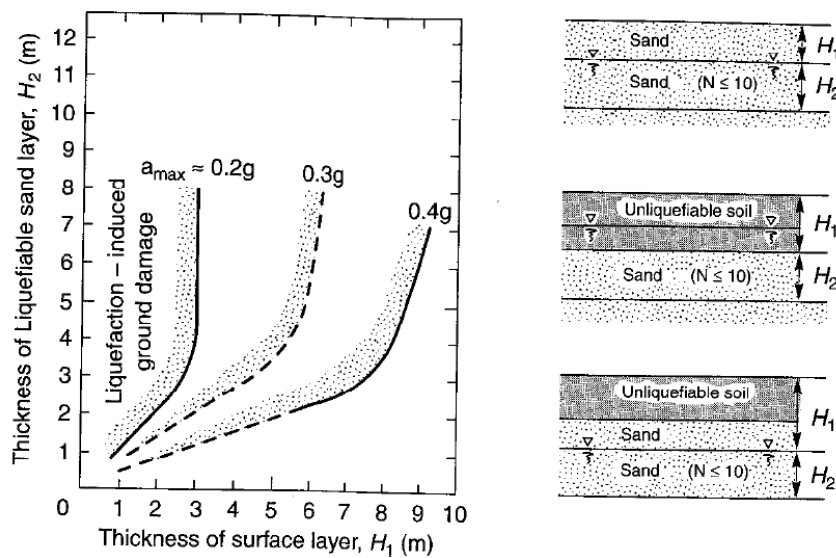


Ilustración 4: método de Ishihara para determinar probabilidad de que la capa licuable afecte en superficie.

Fuente: Geotechnical earthquake engineering (Kramer, S. 1996)

Una vez visto si el afecta o no a las posibles estructuras en superficie se ha hecho una propuesta general de métodos de mejoramiento de suelo.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de todo el trabajo realizado son bastante extensos y contienen mucho material gráfico, es por eso que en este apartado solo se expondrán los resultados más significativos y generales. Los resultados más detallados se expondrán en los anexos indicados.

Primero de todo se ha creado una base de datos con un total de 107 sondeos. La mayoría de una profundidad entre los 5 y los 15 metros y con un total de 13 sondajes de 30m. Todos los sondajes se encuentran en zonas con densidad de construcciones alta, quedando concentrados en la zona de San Pedro centro, Lomas Coloradas y el Venado. Este hecho se debe a la procedencia de los sondajes, ya que la mayoría corresponden a empresas constructoras y el 80% corresponde a la misma empresa de análisis de suelos que tiene sus zonas de influencia.

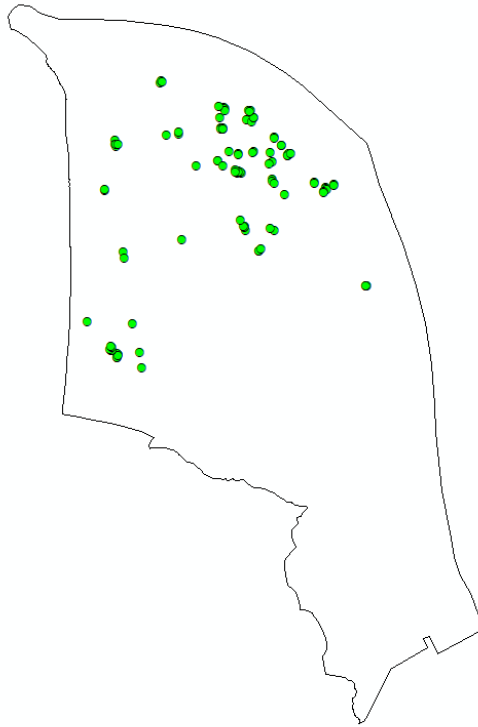


Ilustración 5: distribución de los sondeos
Fuente: elaboración propia

De los 107 sondeos, 106 tienen información estratigráfica, 66 tienen ensayo SPT y 8 tienen ensayo de onda de corte. Aunque la cantidad de este último ensayo es bajo, se encuentran muy repartidos en el territorio.

El primer plano de zonificación, referente a las propiedades de los suelos sin tener en cuenta la normativa, se pueden apreciar en la ilustración 7.

La mitad de zonas tienen más de 12 sondeos y las zonas que tienen menos son la 2 y la 12. Solo han quedado fuera de las zonas 3 sondajes. Dos de ellos se han desestimado por ser del interior

de la Laguna chica de San Pedro y un sondeaje por estar demasiado alejado de otras zonas, concretamente entre la zona 1 y la 11.

Las zonas cubren un 5,4% (3,8km²) de la zona considerada como zona urbana (70km²) y, al igual que los sondeos, se concentran en las zonas ya urbanizadas. Éste porcentaje puede parecer muy bajo, pero se ha de tener en cuenta que no toda el área urbana se ha construido y en San Pedro de la Paz se puede observar una gran extensión de área natural dentro de la zona urbana donde no se ha realizado nunca ningún tipo de estudio. Si solo se tienen en cuenta el área construida hasta el momento (29km² aprox.) el estudio cubre un 13,6% de su extensión.

Primer plano de zonificación

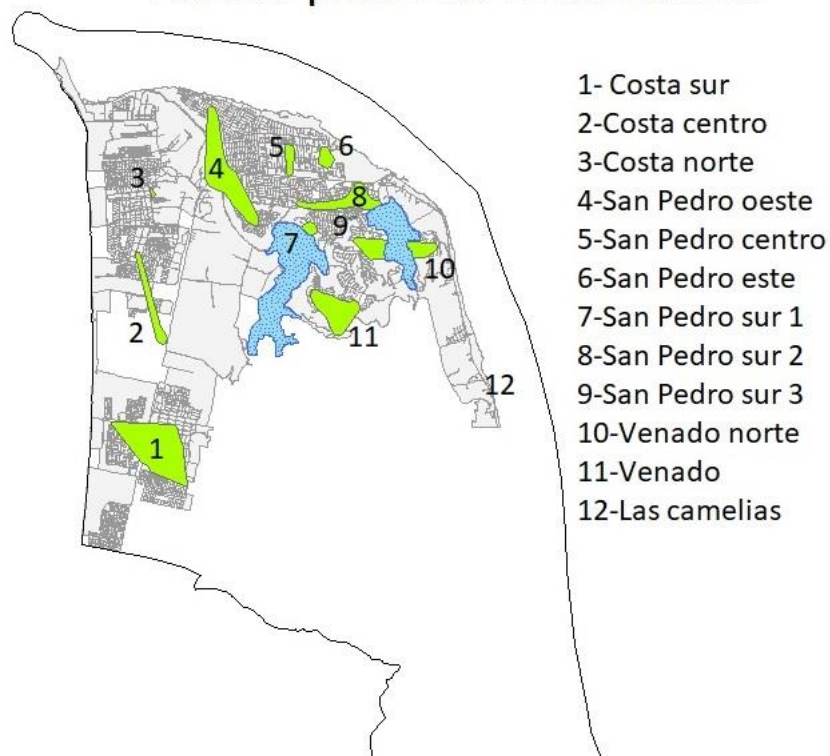


Ilustración 6: primer plano de zonificación
Fuente: elaboración propia

Todas las zonas resultantes se pueden dividir en tres grupos más grandes que se corresponden perfectamente con los mapas geológicos existentes. Un primer grupo de materiales granulares principalmente arenosos, un segundo grupo que se compone de una primera capa de material limoso y granular y una segunda capa de fragmentos de pizarra, y un tercer grupo de zonas con poca información no clasificados.

A continuación, podemos ver la tabla de las zonas granulares:

Prof.	Costa sur	Costa centro	Costa norte	San Pedro O	San Pedro C	San Pedro E	San Pedro Sur 1	San Pedro Sur 2
0	Arenas con diversos niveles de limosidad. SP, SP-SM, SW-SM	Arenas limpias. SP	Arenas con diversos niveles de limosidad. SP, SP-SM, SW-SM	Arenas limpos y con limos con posibles estratos de limo localizados. SP-SM, SM, ML	Arenas lim. y con limos con posibles estratos de limo loc. SP- SM, SM, ML	Arenas limpias. SP	Arenas limpias. SP	Arenas limpos y arenas limosas. SM, SP-SM
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1,8	13	6	11	0,7	10	9,5	0
3	25	144	6	137	61	134	132	0
4	24	25	26	144	19	12	17	9
5	250	174	250	137	162	141	156	130
6	27	31	32	11	21	15	18	4
7	200	185	200	17	165	20	159	102
8	31	200	42	156	174	164	157	136
9	35	193	300	9,2	23	25	20	151
10	193	179	300	131	170	175	164	151
11	27	173	300	12	193	28	174	12
12	173	172	300	139	35	200	171	141
13	24	172	300	140	37	40	181	153
14	24	172	300	175	47	42	28	22
15	31	185	300	20	210	203	195	168
16	40	185	300	170	50	214	195	39
17	39	179	300	50	214	214	199	214
18	42	163	300	20	192	214	202	214
19	40	164	300	50	193	214	199	214
20	41	163	300	50	199	214	202	214
21	350	163	300	50	206	214	214	214
22	47	167	300	50	214	214	214	214
23	47	170	300	50	214	214	214	214
24	49	174	300	50	214	214	214	214
25	49	180	500	50	212	214	214	214
26	50	199	500	50	214	214	214	214
27	50	205	500	50	214	214	214	214
28	50	210	620	50	214	214	214	214
29	50	210	620	50	207	214	214	214
30	50	210	625	50	203	214	214	214
	50	208	625	50	204	214	214	214
	50	205	625	50	205	214	214	214
	50	207	625	50	204	214	214	214
	50	200	625	50	202	214	214	214
	50	192	625	50	204	214	214	214
	50	200	625	50	204	214	214	214
	50	201	625	50	202	214	214	214
	50	201	625	50	196	214	214	214

Tabla 4: resultados primer plano de zonificación
Fuente: elaboración propia

A continuación podemos ver la tabla de las zonas del segundo grupo:

Prof.	Venado norte		Venado	
0	Limo arcil,	0	0	0
1	con alguna	5	1	57
2	bolsa de	9	10	133
3	arena lim, y	9	4	103
4	lentes de	14	5	106
5	limo. ML,	43	4	103
6	MH, SM.	40	5	110
7		50	6	115
8		50	7	121
9		50	8	126
10		50	9	130
11		50	10	134
12		50		
13		50		
14		50		
15		50		
16	Fragmentos	50		
17	de roca	50		
18	pizarra con	50		
19	matriz	50		
20	limosa. GP,	50		
21	GW, GP-	50		
22	GM.	50		
23		50		
24		50		
25		50		
26		50		
27		50		
28		50		
29		50		
30		50		

Tabla 5: resultados primer plano de zonificación
Fuente: elaboración propia

Por su poco interés las tablas del tercer grupo no han sido incluidas en la memoria. Su información se puede consultar en el anexo correspondiente.

En el Anexo 6 se pueden apreciar la información de cada sector según las imágenes de software.

En el segundo plano de zonificación solo se han podido zonificar las zonas con información a 30m por las especificaciones correspondientes a la Vs30 en la normativa, quedando 7 zonas clasificadas como se puede observar en el siguiente plano.

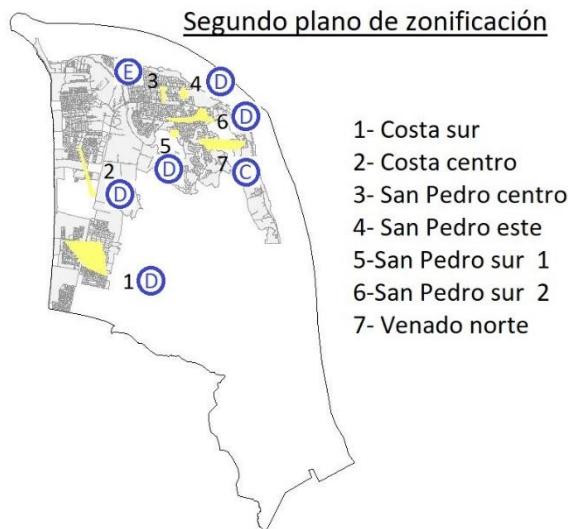


Ilustración 7: segundo plano de zonificación
Fuente: elaboración propia

Se puede observar que tenemos la mayoría de zonas clasificadas como D, teniendo una zona clasificada como E y una como C que corresponde a la zona del Venado Norte.

En la siguiente tabla podemos consultar los datos finales de SPT y Vs30 por cada zona y su consiguiente clasificación según la normativa:

	Costa sur	Costa centro	San Pedro centro	San Pedro este	San Pedro sur 1	San Pedro sur 2	Venado norte
Vs30 (m/s)	327,2	190,5	318,7	198,0	307,5	345,8	442,2
SPT (n golpes)	32,3	31,9	28,8	33,9	43,5	39,9	40,7
Clasificación	D	D	E	D	D	D	C

Tabla 6: resultados segundo plano de zonificación
Fuente: elaboración propia

Por lo que se refiere al análisis de licuación, en la siguiente tabla se puede consultar la información extraída de la metodología de Idris y Boulanger (2004, 2008):

Prof.	Costa sur	Costa centro	San Pedro C	San Pedro E	San Pedro Sur 1	San Pedro Sur 2	Venado norte
1	OK	OK	OK	LICUA	LICUA	LICUA	LICUA
2	OK	OK	OK	LICUA	OK	LICUA	LICUA
3	OK	OK	OK	OK	OK	OK	LICUA
4	OK	OK	OK	OK	OK	LICUA	OK
5	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
6	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
7	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
8	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
9	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
10	OK	LICUA	OK	OK	OK	OK	OK
11	OK	LICUA	OK	OK	OK	OK	OK
12	OK	LICUA	OK	OK	OK	OK	OK
13	OK	LICUA	OK	OK	OK	OK	OK
14	OK	LICUA	OK	OK	OK	OK	OK
15	OK	LICUA	OK	OK	OK	OK	OK
16	OK	LICUA	OK	OK	OK	OK	OK
17	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
18	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
19	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
20	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
21	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
22	OK	OK	LICUA	OK	OK	OK	OK
23	OK	OK	LICUA	OK	OK	OK	OK
24	OK	OK	LICUA	OK	OK	OK	OK
25	OK	OK	LICUA	OK	OK	OK	OK
26	OK	OK	LICUA	OK	OK	OK	OK
27	OK	LICUA	LICUA	OK	OK	OK	OK
28	LICUA	LICUA	LICUA	OK	OK	OK	OK
29	LICUA	LICUA	LICUA	OK	OK	OK	OK
30	LICUA	LICUA	LICUA	OK	OK	OK	OK

Tabla 7: resultados de licuación por estratos según Idris y Boulanger (2004, 2008)
Fuente: elaboración propia

Se pueden observar tres tipos de zonas con potencial de licuación. Licuación en estratos profundos, en estratos superficiales y en estratos intermedios. La licuación en estratos profundos se debe a la reducción del valor de ensayo de SPT debido a la corrección por presión de confinamiento y veremos que, de producirse, no suele afectar en superficie por su profundidad. Los sectores con potencial de licuación en superficie vienen determinados por la calidad de los suelos en las capas superficiales, que suele ser bastante inferior a las capas

profundas. Estos casos deben ser analizados en mayor detalle para saber si presentarían efectos en superficie como veremos más a delante. El sector con estrato licuable intermedio se debe a una reducción brusca y localizada de los valores de ensayo de SPT ya observable en los resultados del primer plano de zonificación. Como veremos, de licuar este estrato tendría efectos en superficie.

En el Anexo 7 se puede consultar esta información en imágenes tal como están presentadas en ArcMap.

Una vez realizados los dos planos de zonificación se procede a la comparación entre estos y el Plan Regulador Comunal de San Pedro de la Paz. De esta, se puede extraer que, con los datos disponibles en este estudio, el PRC se adecúa bien a la normativa sísmica y ninguna propuesta de cambio tiene sentido de ser. En todos los sectores estudiados tenemos algún tipo de fundación adecuada para construir sin muchos problemas y los sectores dónde el PRC es más restrictivo es por motivos difíciles de cambiar. Estos sectores son los que rodean las lagunas y humedales de la comuna y por lo tanto no tendría ningún sentido cambiar su estatus de valor medioambiental o equipamientos y parques urbanos, no sin hacer un estudio más profundo del impacto que este cambio tendría.

En la siguiente tabla se pueden consultar los resultados de la comparación realizada así como una serie de recomendaciones en lo que se refiere a las fundaciones a realizar.

<u>Zona</u>	COSTA SUR	COSTA CENTRO
<u>Zonificación</u>	Buenas condiciones para fundaciones en todos los estratos.	Estrato fluidificable entre 6 y 12m y a partir de 24m.
<u>PRC</u>	Zona habitacional mixta Zona industrial	Zona habitacional mixta Zona industrial
<u>Sistema de fundación</u>	El sistema de fundación estará condicionado por la tipología del edificio ya que los suelos no presentan problemas remarcables.	Los estratos fluidificables a 24m no tienen afectación en superficie. El estrato fluidificable de 7 a 12 m de profundidad tiene afectación en superficie. Con un remplazo de 8,5m de suelo se solucionaría el problema. Otros métodos a considerar pueden ser los drenes verticales (mechas drenantes o columnas de grava) o el mejoramiento por entibación de elementos rígidos.
<u>Congruencia con plan comunal</u>	Los suelos no presentan problemas y permiten el uso del suelo definido en el PRC.	Los suelos no presentan problemas muy notables y permiten el uso del suelo definido en el PRC. No obstante se tiene que tener en cuenta que existen estratos fluidificable.

<u>Zona</u>	COSTA NORTE	SAN PEDRO OESTE
<u>Zonificación</u>	Se precisan estudios a mayor profundidad.	Licuefacción en los primeros 7m.
<u>PRC</u>	Zona habitacional mixta	Zona habitacional mixta Zona valor natural
<u>Sistema de fundación</u>	Se precisan estudios a mayor profundidad.	El estrato de 0 a 9,65m de profundidad presenta problemas de fluidificación. Con un remplazo de suelo de 6m de profundidad se solucionaría este problema. Otros métodos a considerar pueden ser los drenes verticales (mechas drenantes o columnas de grava) o el mejoramiento por entibación de elementos rígidos.
<u>Congruencia con plan comunal</u>	Se precisan estudios a mayor profundidad.	Los suelos no presentan problemas y permiten el uso del suelo definido en el PRC. No obstante se tiene que tener en cuenta que existen estartos fluidificable. La cercanía al humedal de los Batros y la laguna grande hacen que parte del suelo de buenas características sea destinado a Zona de valor natural.
<u>Zona</u>	SAN PEDRO CENTRO	SAN PEDRO ESTE
<u>Zonificación</u>	condiciones para fundaciones en todos los	Licuefacción en los primeros metros.
<u>PRC</u>	Zona habitacional mixta	Zona habitacional mixta
<u>Sistema de fundación</u>	Los suelos licuables no presentan afectación en superficie, por lo tanto, el sistema de fundación estará condicionado por la tipología del edificio.	Los suelos licuables no presentan afectación en superficie por tener napa por debajo del estrato licuable, por lo tanto, el sistema de fundación estará condicionado por la tipología del edificio.
<u>Congruencia con plan comunal</u>	Los suelos no presentan problemas y permiten el uso del suelo definido en el PRC.	Los suelos no presentan problemas y permiten el uso del suelo definido en el PRC.
<u>Zona</u>	SAN PEDRO SUR 1	SAN PEDRO SUR 2
<u>Zonificación</u>	condiciones para fundaciones en todos los	Licuefacción en los primeros 7m.
<u>PRC</u>	Zona equipamiento parque metropolitano	Zona habitacional mixta
<u>Sistema de fundación</u>	El sistema de fundación estará condicionado por la tipología del edificio ya que los suelos no presentan problemas remarcables.	A priori los estratos licuables no presentan grandes problemas por estar por encima de la napa, pero esta es muy variable así que se tiene que realizar estudio más preciso para cada proyecto.
<u>Congruencia con plan comunal</u>	Los suelos no presentan problemas y permitirían un uso más intensivo del que plantea el PRC. No obstante, por su cercanía con la Laguna grande se dedica la zona a equipamientos y zona de parque metropolitano.	Los suelos no presentan problemas muy notables y permiten el uso del suelo definido en el PRC. No obstante se tiene que tener en cuenta que existen estartos fluidificable.

<u>Zona</u>	SAN PEDRO SUR 3	LAS CAMELIAS
<u>Zonificación</u>	Se precisan estudios a mayor profundidad.	Se precisan estudios a mayor profundidad.
<u>PRC</u>	Zona habitacional mixta Zona extensión en pendiente	Zona habitacional mixta
<u>Sistema de fundación</u>	Se precisan estudios a mayor profundidad.	Se precisan estudios a mayor profundidad.
<u>Congruencia con plan comunal</u>	Se precisan estudios a mayor profundidad.	Se precisan estudios a mayor profundidad.
<u>Zona</u>	VENADO	VENADO NORTE
<u>Zonificación</u>	Licuefacción en los primeros 10m.	Licuefacción en los primeros 10m.
<u>PRC</u>	Zona extensión en pendiente	Zona habitacional mixta Zona extensión en pendiente
<u>Sistema de fundación</u>	Los suelos licuables no presentan afectación en superficie por tener napa por debajo del estrato licuable, por lo tanto, el sistema de fundación estará condicionado por la tipología del edificio.	Los suelos licuables no presentan afectación en superficie por tener napa por debajo del estrato licuable, por lo tanto, el sistema de fundación estará condicionado por la tipología del edificio.
<u>Congruencia con plan comunal</u>	Los suelos no presentan problemas muy notables y permiten el uso del suelo definido en el PRC. No obstante se tiene que tener en cuenta que existen estartos fluidificable. Al ser una zona de extensión en pendiente no se puede explotar de forma intensiva y la misma pendiente dificulta la construcción.	Los suelos no presentan problemas muy notables y permiten el uso del suelo definido en el PRC. No obstante se tiene que tener en cuenta que existen estartos fluidificable. Al ser una zona de extensión en pendiente no se puede explotar de forma intensiva y la misma pendiente dificulta la construcción.

Tabla 8: resultados comparación PRC
Fuente: elaboración propia

6. CONCLUSIONES

La creación de la base de datos se ha realizado exitosamente para ser consultada en Excel y ArcMap®. Aunque el número de sondajes es más bien bajo, se ha definido una buena base para futuros trabajo cubriendo un 13,6% de la zona actualmente urbanizada. Se ha explicado punto por punto como se ha generado (Anexo 1) permitiendo así una fácil actualización atendiendo a la necesidad de futuros trabajos.

Se ha realizado el primer plano de zonificación para ser consultado en ArcMap® y se ha expuesto detalladamente el proceso seguido para generarlo siendo así fácilmente actualizable y consultable. Como se puede ver en los resultados, las estratigrafías obtenidas guardan una fuerte correlación con las del plano aportado por el SERNAGEOMIN utilizado en el apartado de antecedentes geológicos por lo que podemos afirmar su adecuación a la realidad estudiada en pasados proyectos. También se corresponde la profundidad de estrato de buenas características

aportado por el SERNAGEOMIN a partir de las mediciones de periodo predominante con la información producto de la zonificación. La utilización de correlaciones a la hora de estudiar la velocidad de onda de corte ha sido útil en los sectores sin información de campo, aunque tendrían que haber sido usadas mediciones reales.

A partir de la implementación de la normativa se ha realizado el segundo plano de zonificación para ser consultado en ArcMap®. Se han podido zonificar según este plano las 7 zonas del primer plano de zonificación que disponían de información a 30m quedando la mayoría clasificada como D con una zona E y una C. El análisis de licuación nos aporta información congruente con la del plano del SERNAGEOMIN indicando la posible afectación por este fenómeno en los sectores Costa centro y San Pedro oeste. No se puede afirmar la misma congruencia en lo que se refiere a clasificaciones de suelo según la normativa. Se puede concluir que al haber usado correlación para determinar información de Vs30 en los sectores sin información de campo, se han clasificado estos suelos de forma conservadora teniendo mejores clasificaciones en el plano aportado por el SERNAGEOMIN.

La comparación de la zonificación con el PRC no se ha podido realizar extensamente por la falta de datos. Con los datos disponibles, se puede concluir que el PRC de San Pedro de la Paz no presenta problemas con la zonificación resultante del Decreto Supremo n6.

7. RECOMENDACIONES PARA FUTURAS ACTUALIZACIONES

Es imperante actualizar la base de datos con más información, y ya no en todas las zonas descritas como en las zonas donde no se ha podido obtener ninguna información. Se tiene que expandir la recolección de datos y para facilitar esto puede ser interesante encargar algunos sondeos en puntos clave.

No se tiene que recurrir a correlaciones para el cálculo de Vs30 ya que la normativa así lo indica. Se pueden realizar estudios en puntos clave en las zonas donde falta dicha información.

Para verificar el método de licuación de suelos adoptado, Idriss y Boulanger (2004,2008), se recomienda hacer un estudio sobre la historia de casos de licuefacción en la zona y compararlo con la curva obtenida por el método escogido.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aoki, N., Esquivel, E. R., Neves, L. F., & Cintra, J. C. A., (2007). The impact efficiency obtained from static load test performed on the SPT sampler. *Soils and foundations*, 47(6), 1045-1052.
- Decreto Supremo N°61, Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Subsecretaria, Santiago, Chile, 02 Noviembre 2011.
- González, G., (2011), Análisis de correlaciones existentes entre ensayo SPT y ondas de corte, para sectores en estudio. Proyecto de Título, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile.
- Inostroza, G., (2004), Metodología de estratificación y zonificación de los suelos de la Comuna de Concepción, mediante la aplicación de SIG. Proyecto de Título, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile.
- Norma Chilena Oficial 433.Of1996 Mod. 2009, Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile, 27 noviembre 2009.
- Plan Regulador Comunal de San Pedro de la Paz, 2015.
- Skempton, A. W. (1986). Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and over consolidation, *Geotechnique*, 36(3), 425-447.
- Castillo, L., (2017), Análisis post terremoto 2010 de la zonificación y estratificación de las comunas de Talcahuano y Hualpén. Proyecto de Título, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile.
- Sáez, P., (2016), Actualización de la estratificación y zonificación de los suelos en la Comuna de Concepción. Proyecto de Título, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile.
- Mominul Hoque, M. (2019). *Evaluation of Liquefaction Potential from SPT and CPT*. [online] ISSMGE. Disponible en: <https://www.issmge.org/uploads/publications/1/45/06-technical-committee-02-tc102-13.pdf> [Acceso 14 Apr. 2019].
- Hettiarachchi, H. (2015). Use of SPT Blow Counts to Estimate Shear Strength Properties of Soils: Energy Balance Approach. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.

- Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures :
ASCE/SEI 7-16, 2017, American Society of Civil Engineers.
- Day, Robert W. (2012), Geotechnical earthquake engineering handbook

Índice anexos

Anexo 1: Metodologías de software extendidas	2
Creación de base de datos de sondeos profundos mediante SIG	2
Creación de primera zonificación.....	3
Generación de plano de zonificación menos geométrico.....	6
ANEXO 2: “ENSAYO SPT Y CORRECCIONES”	9
Correcciones Parámetros Ensayo de Penetración Estándar (SPT)	9
ANEXO 3: “ESTIMACIÓN DE VS30 EN SECTORES SIN INFORMACIÓN EMPÍRICA”	11
ANEXO 4: “NORMATIVA ACTUAL, DS n61”	12
ANEXO 5: “ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN”	13
Potencial de Licuación.....	13
Resultados licuefacción por ambos métodos y comparación.....	14
ANEXO 6: “Resultados primer plano de zonificación”	21
ANEXO 7: “Resultados segundo plano de zonificación”	28

Anexo 1: Metodologías de software extendidas

El siguiente anexo no pretende ser un manual exhaustivo de cómo manejar los programas informáticos usados en el trabajo, si no de las herramientas dentro de estos que se necesitan. Un buen manejo de otras funciones más básicas en los programas es vital.

Creación de base de datos de sondeos profundos mediante SIG


1- Incorporar toda la información a una planilla Excel homogenizando todos los campos. Los campos necesarios son:

- X,Y,Z: coordenadas en el sistema de referencia escogido.
- Prof_nap: profundidad de la napa
- Fecha: fecha de realización del sondeo
- E_*: Propiedades de cada estrato

Una vez realizada la tabla guardar el documento como .xls y no como .xlsx ya que de lo contrario ArcMap® no lo leerá.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Y	X	Z	Prof_nap	Fecha	E_1	E_2	E_3
2		-78,2	-35,000000	23,00	2 23/10/2019	tu		
3		-75,28	-37,550000	12,00	3 24/10/2019	uy		
4		-73,56	-36,070000	56,00	5 25/10/2019	io		
5		-73,033389	-36,817667	23,00	5 26/10/2019	tu		
6		-71,33	-36,020000	14,00	5 27/10/2019	io		
7		-79,71	-33,330000	23,50	2 12/03/2018	uy		
8		-77,56	-33,817667	22,80	3 13/03/2018	tu		
9		-73,88	-34,990000	22,10	5 14/03/2018	io		
10		-70,55	-32,817667	21,40	4 15/03/2018	tu		
11		-70,44	-30,200000	20,70	4 16/03/2018	uy		

Ilustración 1: base de datos en Excel (elab.prop.)

2- Introducir datos en Layer con la herramienta Add XY data . Para seleccionar nuestro documento .xls usaremos el botón “Browse “

En este paso es muy importante definir el sistema de referencia geográfica a usar con el botón “Edit”.

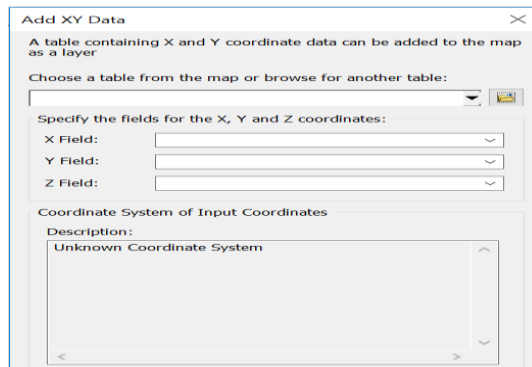


Ilustración 2: menú de ArcMap para añadir puntos (elab.prop.)

- 3- Para identificar cada sondeo y poder realizar muchas operaciones en el programa se tiene que asociar un ID a cada punto. Esto lo realizamos clicando con el botón derecho en la Tabla de contenidos arriba de la capa exportada y yendo a “Data”→”Export Data”. Esta operación nos crea una nueva capa que será con la que trabajaremos a partir de ahora.

Creación de primera zonificación

- 1- Separamos los puntos según criterio conveniente usando la herramienta “Make feature layer”. Con el botón “Create Query” se realiza el sesgo de una forma sencilla. Se visualizan fácilmente los grupos creados.

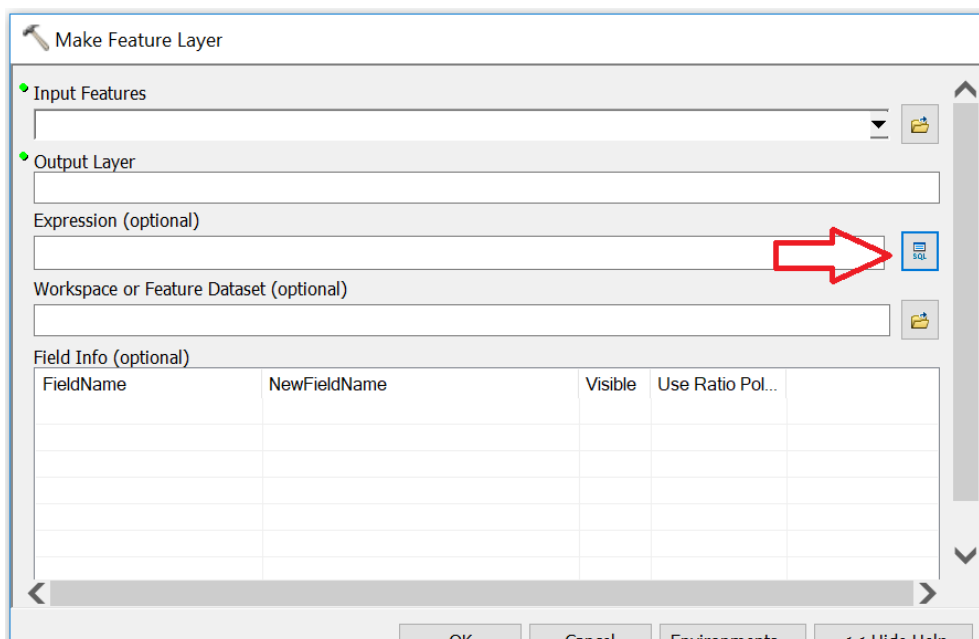


Ilustración 3:menú de ArcMap de "Make feature layer" (elab.prop.)

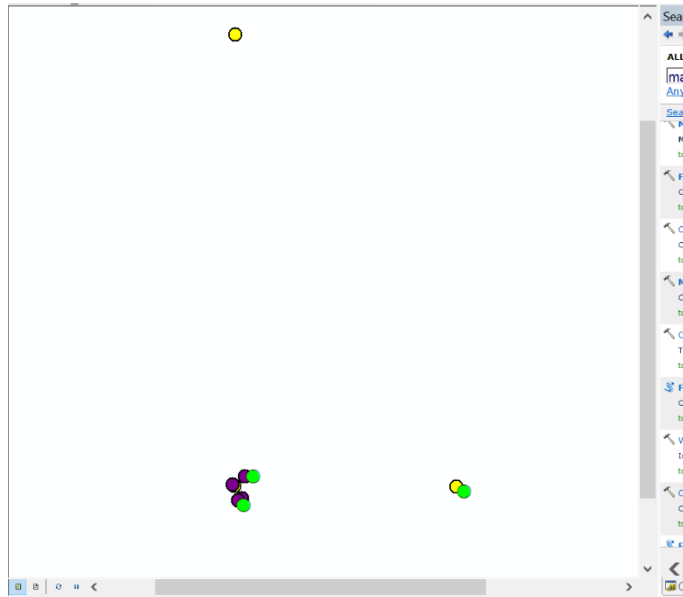


Ilustración 4: grupos creados. (elab.prop.)

- 2- Creamos una red de polígonos de Thiessen para generar las fronteras entre puntos que tengan áreas de influencia cercanas mediante la herramienta “Create Thiessen Polygons”. Seleccionar “all” output fields para que los polígonos tengan los mismos campos que los puntos por los que se han generado. Para esta operación es imprescindible tener el zoom lo más alejado que podamos de los puntos y dentro del menú de “Create Thiessen Polygons” pinchar en el botón “Environments” para cambiar el área de trabajo a “The same as display”.

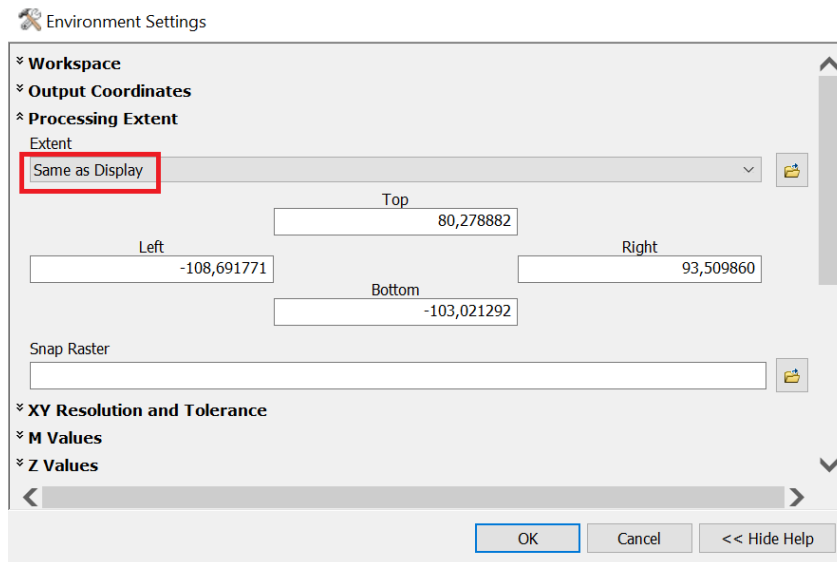


Ilustración 5: environment settings (elab.prop.)

- 3- Una vez tenemos la red de polígonos de Thiessen debemos separarlos con los mismos criterios utilizados en el punto 4 y siguiendo el mismo procedimiento. De esta forma nos queda una red de polígonos como la siguiente:

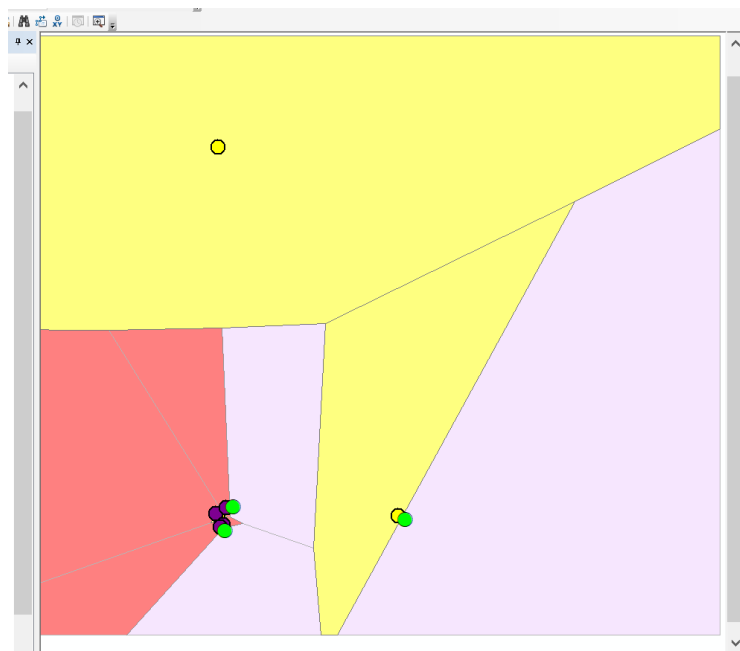


Ilustración 6: polígonos de Thiessen (elab.prop.)

- 4- Ahora se deben crear las áreas de influencia alrededor de los puntos. Para ello usamos la herramienta “Buffer” para cada grupo de puntos.

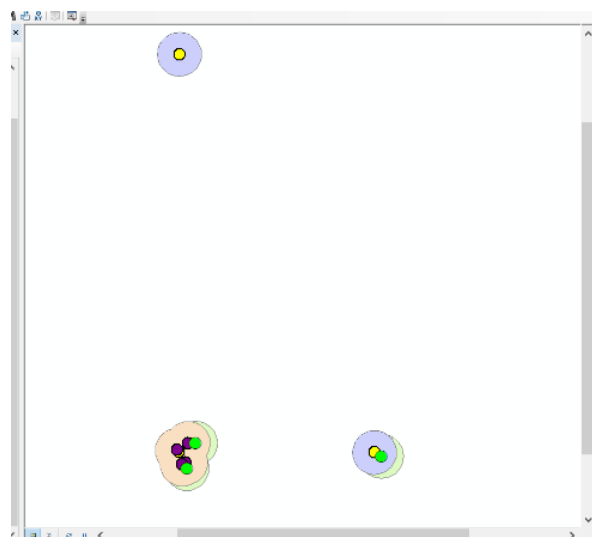


Ilustración 7: buffers (elab.prop.)

- 5- Ahora se debe intersecar los polígonos de Thiessen con los buffers realizados grupo por grupo. Esta operación se realiza con la herramienta con la herramienta

“Intersect”. De esta forma se obtiene un primer plano muy geométrico y con ciertos problemas geométricos que pueden no ser demasiado realistas.

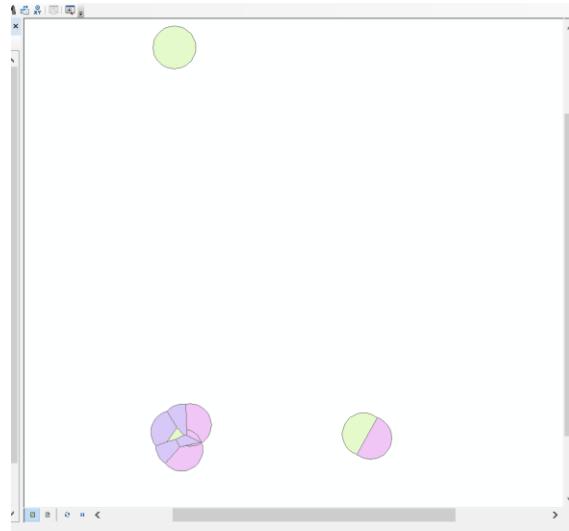


Ilustración 8: resultado (elab.prop.)

Generación de plano de zonificación menos geométrico

- 1- Abrimos Civil3D® y cambiamos el espacio de trabajo a Planificación y análisis

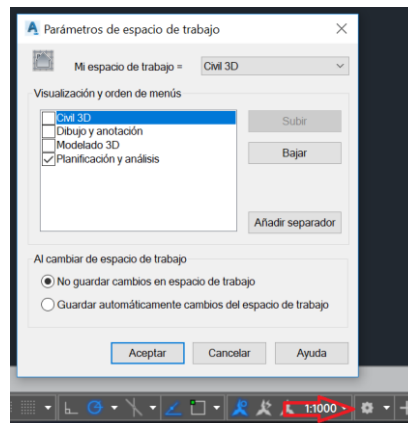


Ilustración 9: espacio de trabajo (elab.prop.)

2- Ejecutamos comando “_MAPWSPACE” y en el panel de tareas vamos a

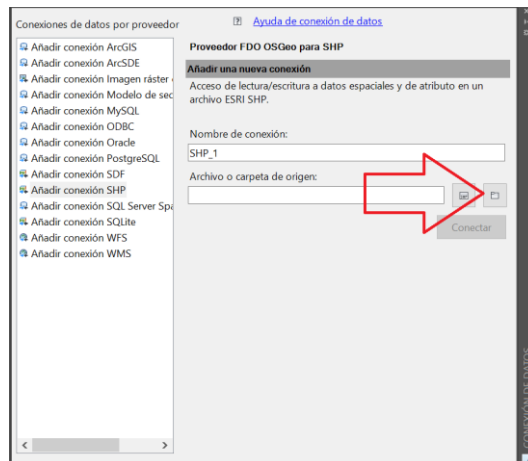


Ilustración 10: menú mapWspace (elab.prop.)

“Datos”→ “Conectar a datos”→ “Buscar carpeta”

Se selecciona la carpeta donde se han guardado los .shp del primer plano de zonificación y se apreta “Conectar”. A continuación seleccionamos los .shp que queremos modificar y apretamos “Añadir al mapa”.

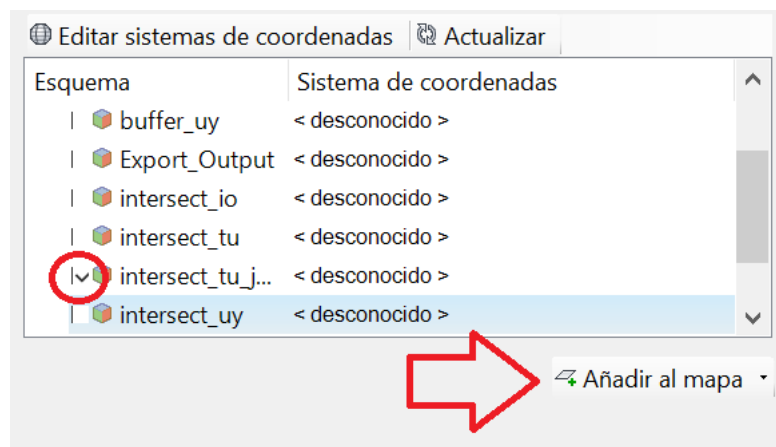


Ilustración 11: añadir mapa menú (elab.prop.)

3- Una vez disponemos de los polígonos en pantalla redibujaremos sus contornos con polilíneas cerradas.

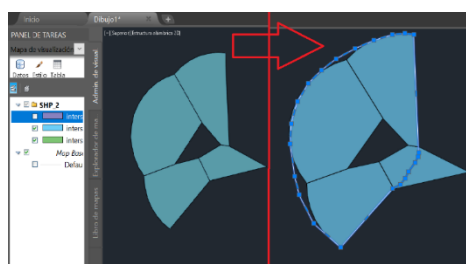


Ilustración 12: esquema nuevo contorno (elab.prop.)

- 4- Con la polilínea creada y cerrada se procede a sombrearla y se guarda el archivo como .dwg.
- 5- Abrimos el documento donde tenemos el primer plano de zonificación en Arcmap® y desde “Add Data” y se selecciona el archivo .dwg que contiene las zonas creadas con Civil3D®.
- 6- Con la herramienta “Feature to polygon” pasamos este polígono .dwg a un .shp. En la pantalla de la herramienta se debe seleccionar el archivo que diga polilínea.

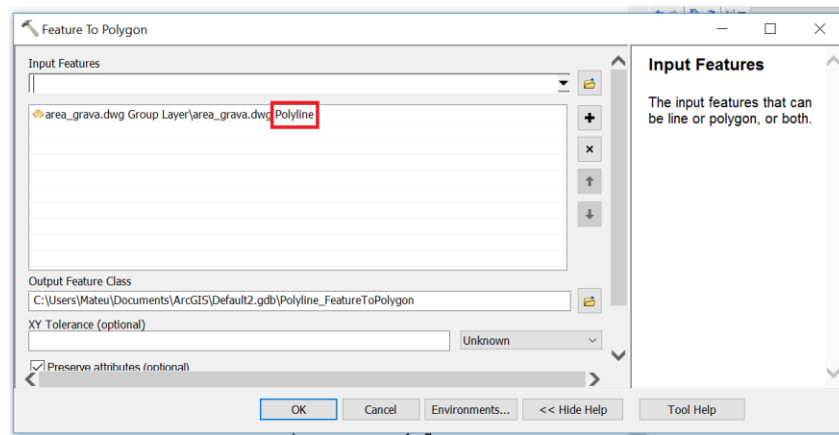


Ilustración 13: feature to polygon menú (elab.prop.)

Podemos ver la figura final

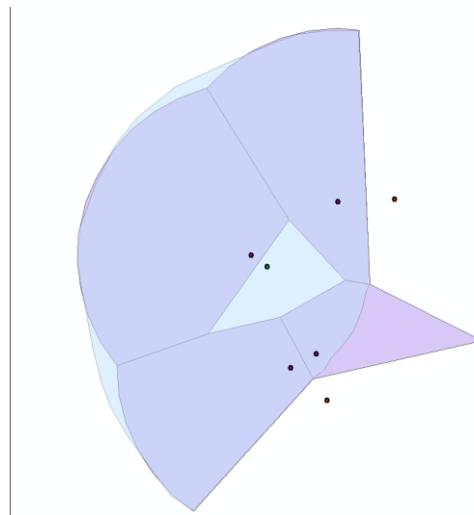


Ilustración 14: comparativa resultado final con forma inicial.
(elab. prop.)

- 7- Entramos a la “Attribute table” de la zona y añadimos los campos
Para realizar esta operación: botón derecho encima de la capa final → Join → seleccionamos el buffer con la información.

ANEXO 2: “ENSAYO SPT Y CORRECCIONES”

Los ensayos SPT de este trabajo han sido corregidas únicamente en los apartados dónde se tenía que aplicar la normativa. Los valores dados en el primer plano de estratificación y zonificación no contemplan la siguiente corrección.

Correcciones Parámetros Ensayo de Penetración Estándar (SPT)

Los datos entregados por el ensayo SPT deben ser corregidos por múltiples factores con el propósito de poder homogenizarlos. Dentro de los factores que afectan a estas correcciones encontramos el diámetro de la perforación, el uso o no de tubo guía, la longitud de barras que penetran el suelo y el nivel aplicado de energía durante el ensayo. Teóricamente, la energía aplicada durante el ensayo depende de la masa y altura de caída del martillo, pero estos valores se ven comúnmente tergiversados por factores como la manipulación del operador, la multiplicidad de equipos existentes, las diferentes configuraciones del martillo de hinca, etc.

Para que este estudio cumpla con las exigencias del D.S. N° 61, el índice de penetración estándar se corregirá por un factor de presión de confinamiento (C_N), quedando, finalmente, la siguiente expresión para N_1 :

$$N_1 = N * C_N$$

Dónde:

N_1 : Índice de penetración estándar corregido por presión de confinamiento de 0,1MPa

N : Índice de penetración estándar

C_N : factor de corrección por confinamiento

El factor de corrección C_N fijado por la normativa se calcula mediante la siguiente expresión:

$$C_N = \frac{2,2}{1,2 + \frac{\sigma'_v}{P_a}}$$

Dónde:

C_N : Factor de corrección por confinamiento, según Kayen et. Al (1992)

P_a : Presión atmosférica

σ'_v : Tensión efectiva de confinamiento

Para el análisis de licuefacción según Idris y Boulanger (2004, 2008) será necesaria, además, la corrección por cantidad de finos, quedando la siguiente expresión:

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60}$$

con

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp\left(\frac{9,7}{FC + 0,01} - \frac{15,7}{FC + 0,01}^2 + 1,63\right)$$

Dónde:

FC: contenido de finos en tanto por ciento.

ANEXO 3: “ESTIMACIÓN DE VS30 EN SECTORES SIN INFORMACIÓN EMPÍRICA”

Después de leer y analizar la memoria de González, G. (2011) se puede determinar que las correlaciones definidas por Sisman y Kiku són las que poseen las correlaciones más efectivas para todo tipos de suelos. Un factor importante que posiciona esta opción como la más adecuada para nuestro trabajo es que dichas correlaciones presentan errores menores al 20% por lo que respecta a mediciones de Vs30 compando sus resultados con los obtenidos de ensayos de Down-hole.

La poca información y datos obtenidos por González G. (2011) hacen que sus resultados no puedan ser validados con seguridad suficiente. Es por eso que se escoge la correlación con unas probabilidades de fallo más bajas. La propuesta de Kiku et al. (2001) es la que nos aporta un factor de seguridad más elevado comparando los valores que nos ofrece con ensayos Down-hole realizados en la comuna de Concepción, que se hacen extensivos a nuestro estudio por ser los suelos de Concepción similares a los de San Pedro de la Paz.

La correlación determinada por Kiku et al. (2001) se define de la siguiente manera:

$$V_s = 68.3 * N_1^{0.292}$$

Dónde:

V_s : Velocidad de ondas de corte determinada a partir de N_1 (m/s)

N_1 : Índice de numero de golpes corregido

ANEXO 4: “NORMATIVA ACTUAL, DS n61”

Para implementar lo definido en la normativa será necesario corregir los datos entregados por los ensayos de penetración (SPT) en forma de índices de penetración estándar (N_{spt}) a una presión de confinamiento fijada por la normativa de 0,1MPa en el caso de arenas. En el anexo 2 se pueden observar dichas correcciones.

El parámetro escogido en el Decreto Supremo N°61 para representar el componente sísmico es la velocidad de corte promedio de los 30m superiores del terreno estudiado (V_{s30}). La velocidad de onda de corte se define como la velocidad de las capas de suelo que se mueven en dirección perpendicular a la velocidad de propagación de la onda. Su expresión es la siguiente:

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{s-1}}}$$

Donde:

V_{s-1} : velocidad de ondas de corte del estrato i (m/s).

h_i : espesor del estrato i (m).

n : número de estratos en los 30 metros superiores del terreno (-).

Los ensayos Down-hole, Cross-hole, o a partir de mediciones de ondas superficiales (Rayleigh), por métodos como SASW, MASW o ReMi, són los métodos más comunes para medir la velocidad de onda de corte.

Una vez realizadas todas estas operaciones debemos realizar un estudio de licuefacción para comprobar que la zona definida no corresponda al grupo F. Con el objetivo de validar de una forma más sólida este estudio, se ha realizado por dos métodos, teniendo y no teniendo en cuenta la cantidad de finos del suelo. El estudio de este fenómeno, la comparativa y el método adoptado se desarrollan de forma más extensa en el anexo 4.

ANEXO 5: “ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN”

Potencial de Licuación

Los métodos que se plantean en este estudio para analizar el potencial de licuefacción son los planteados por Seed y Idris (1972) y Idriss y Boulanger (2004, 2008). Como se ha comentado anteriormente, el más antiguo no tiene en cuenta el contenido de finos (FC) en el NSPT sino en la formulación y el segundo lo tiene incorporado en el NSPT. Ambos métodos plantean realizar el cálculo del potencial de licuación a partir de los valores aportados por el ensayo SPT.

Trabajando con dos variables, una correspondiente a la demanda sísmica que se espera de un suelo durante un sismo de diseño (CSR) y una que representará la resistencia cíclica de oposición a la licuación del suelo (CRR).

La variable correspondiente al sismo de diseño se obtendrá mediante la siguiente expresión y es idéntica en ambos métodos:

$$CSR = 0.65 \left(\frac{a_{m\acute{a}x}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) r_d$$

Dónde:

$a_{m\acute{a}x}$: máxima aceleración de la superficie de suelo generada por un sismo (0,4g)

g : aceleración de gravedad

σ_{v0} : esfuerzo normal vertical total, referido a la superficie del suelo

σ'_{v0} : esfuerzo normal vertical efectivo, referido a la superficie del suelo

r_d : coeficiente de reducción de esfuerzos

La expresión que permite determinar la relación de resistencia cíclica CRR, se basa en métodos empíricos obtenidos a partir de eventos de licuación de suelos para terremotos de magnitud 7,5 en la escala de Richter. La fórmula que se usa en el análisis de 1972 es la planteada Rauch (1998):

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{(10 * (N_1)_{60} + 45)^2} - 0.005$$

Dónde:

$(N_1)_{60}$: valor de ensayo SPT corregido por presión de confinamiento tal como se establece en Anexo 2.

La fórmula que se usa en el análisis Idriss y Boulanger (2004, 2008) es la siguiente:

$$CRR_{7.5} = \exp\left(\frac{(N_1)_{60cs}}{14,1} + \frac{(N_1)_{60cs}^2}{126} - \frac{(N_1)_{60cs}^3}{23,6} + \frac{(N_1)_{60cs}^4}{25,4} - 2,8\right)$$

Dónde:

$(N_1)_{60cs}$: valor de ensayo SPT corregido por presión de confinamiento y cantidad de finos tal como se establece en el Anexo 2.

Con ambos factores calculados para cada método se puede obtener dos factores de seguridad de oposición a la licuación realizando un cociente entre la resistencia cíclica de licuación del suelo y la demanda sísmica del sismo de diseño:

$$FS_L = \frac{CRR_{7.5}}{CSR}$$

Resultados licuefacción por ambos métodos y comparación.

A continuación, podemos observar la estratigrafía de cada zona con el respectivo análisis de licuación a cada lado.

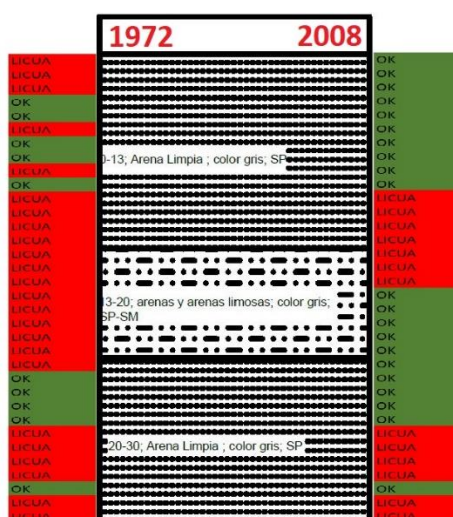


Ilustración 15: lic. costa centro (elab.prop.)

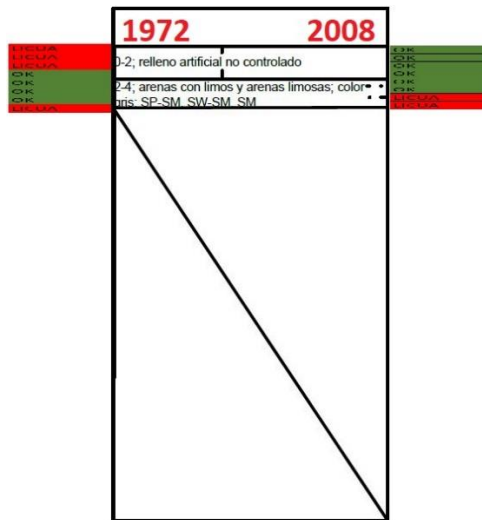


Ilustración 16: lic. costa norte (elab.prop.)

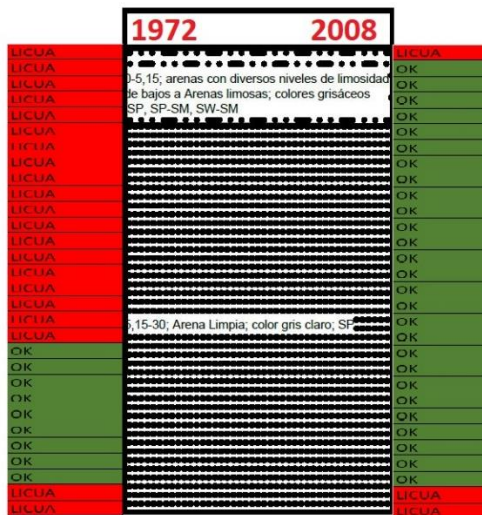


Ilustración 17: lic. Costa sur (elab.prop)

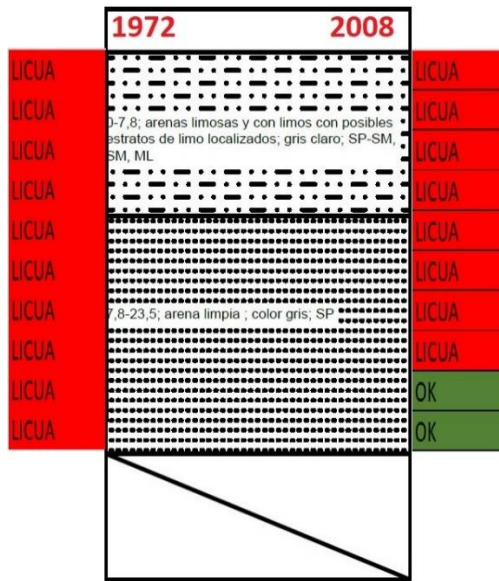


Ilustración 21: lic. San Pedro Oeste (elab.prop.)

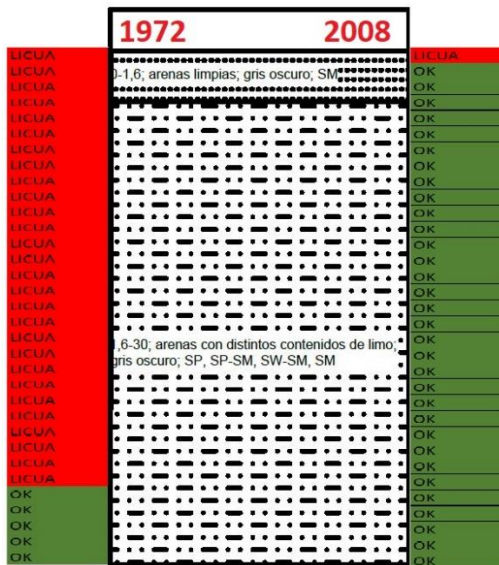


Ilustración 22: lic. San Pedro sur 1 (elab.prop.)

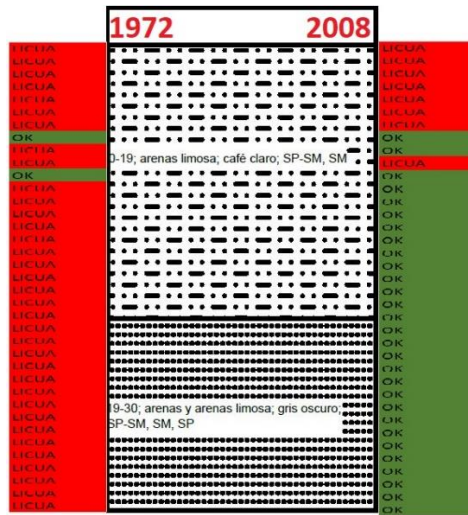


Ilustración 23: lic. San Pedro sur 2 (elab.prop.)

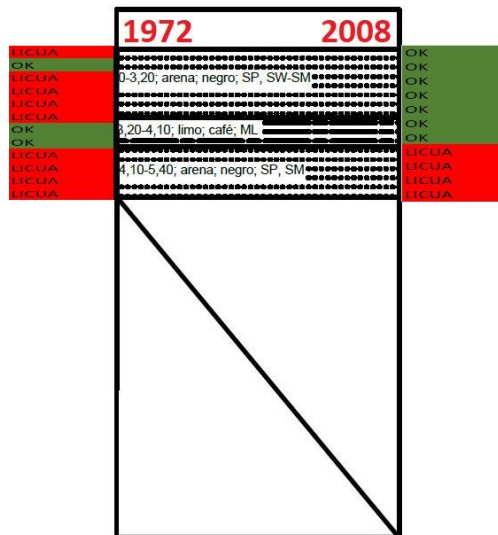


Ilustración 24: lic. San Pedro Sur 3 (elab.prop.)

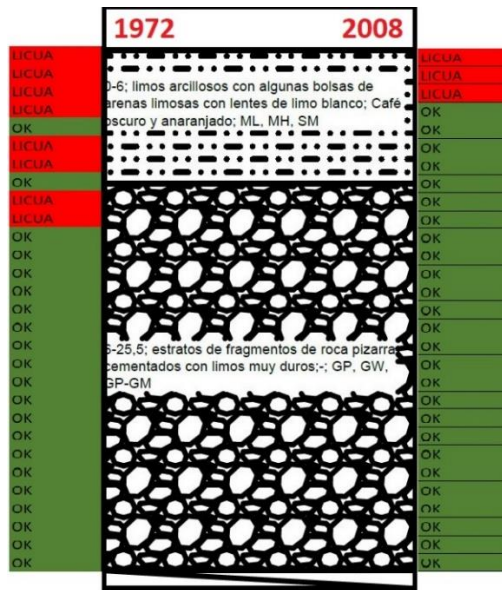


Ilustración 25: lic. venado norte (elab.prop.)

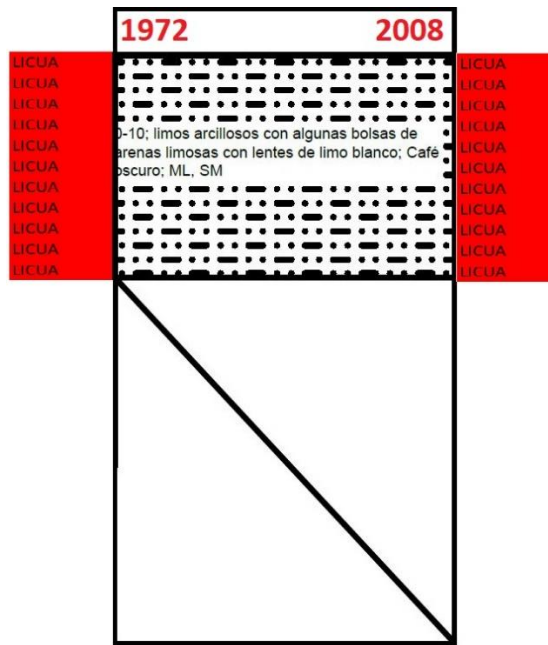


Ilustración 26: lic. venado (elab.prop.)

Lo primero que podemos observar, es que el método de Idriss y Boulanger (2004, 2008) es mucho menos restrictivo. Esto no se debe solo a que tenga en cuenta la cantidad de finos dentro del NSPT, la fórmula del $CRR_{7.5}$ de este método da valores más altos de por sí que la del método de Seed y Idris (1972) con los mismos valores del SPT.

Otro resultado a tener en cuenta y analizar es el potencial de licuefacción de arenas a mucha profundidad y con valores SPT muy altos como se observa en las zonas Costa sur, costa centro y San Pedro centro. Esto se debe a la gran reducción que produce C_N con el

aumento de σ'_v en su fórmula. Aunque estos estratos fluidificaran, no sería de gran importancia ya que se encuentran a profundidades superiores a los 25m.

Debido a que los suelos de la zona son granulares con una cantidad de finos bien variable, se ha optado por usar el método de Idriss y Boulanger (2004, 2008) teniendo muy en cuenta que de esta manera queda un análisis más permisivo.

ANEXO 6: “Resultados primer plano de zonificación”

En este anexo se encuentran los resultados del primer plano de zonificación. Se presenta un plano indicador de las zonas y una ficha de cada zona definida con su información básica definida anteriormente.

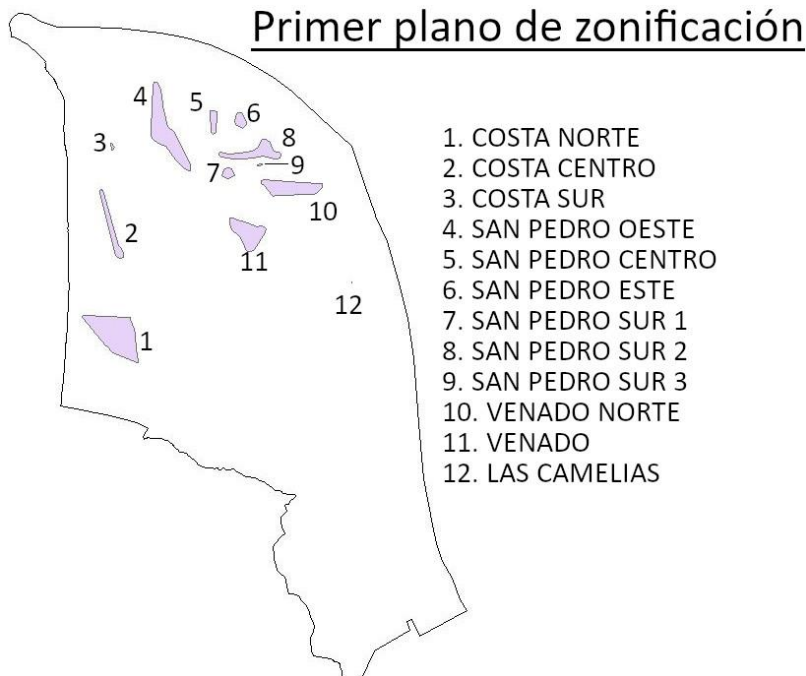


Ilustración 27: plano orientativo primer plano (elab.prop.)

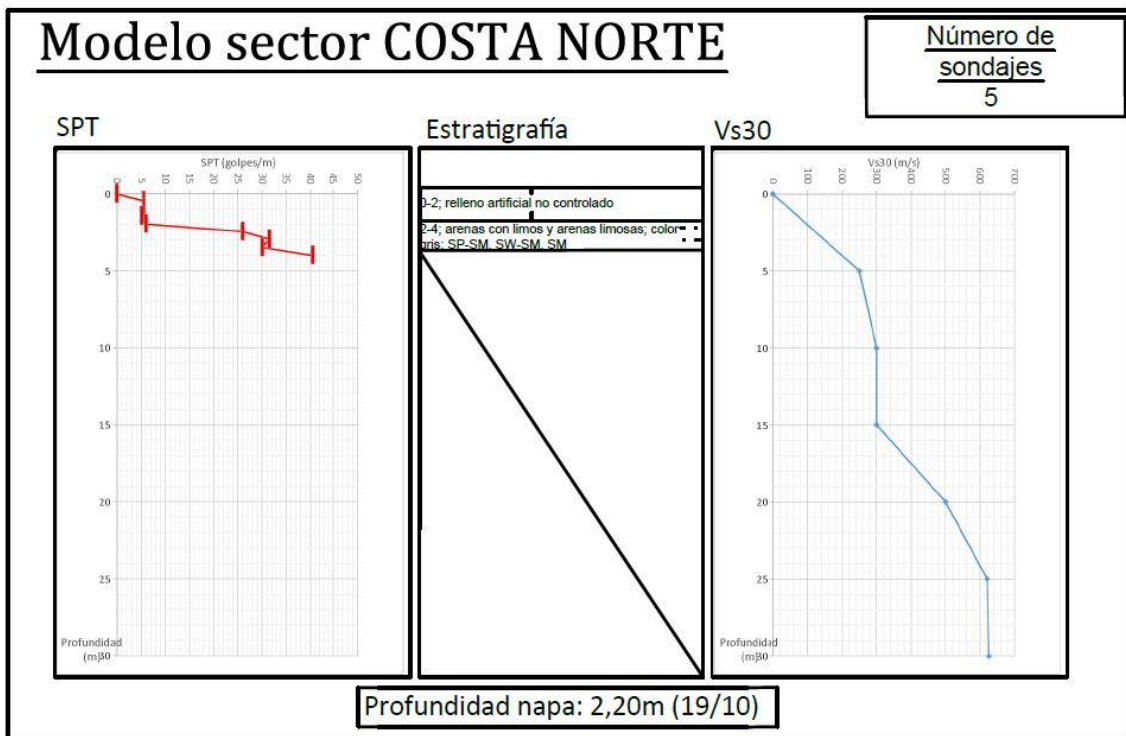


Ilustración 28: modelo costa norte (elab.prop.)

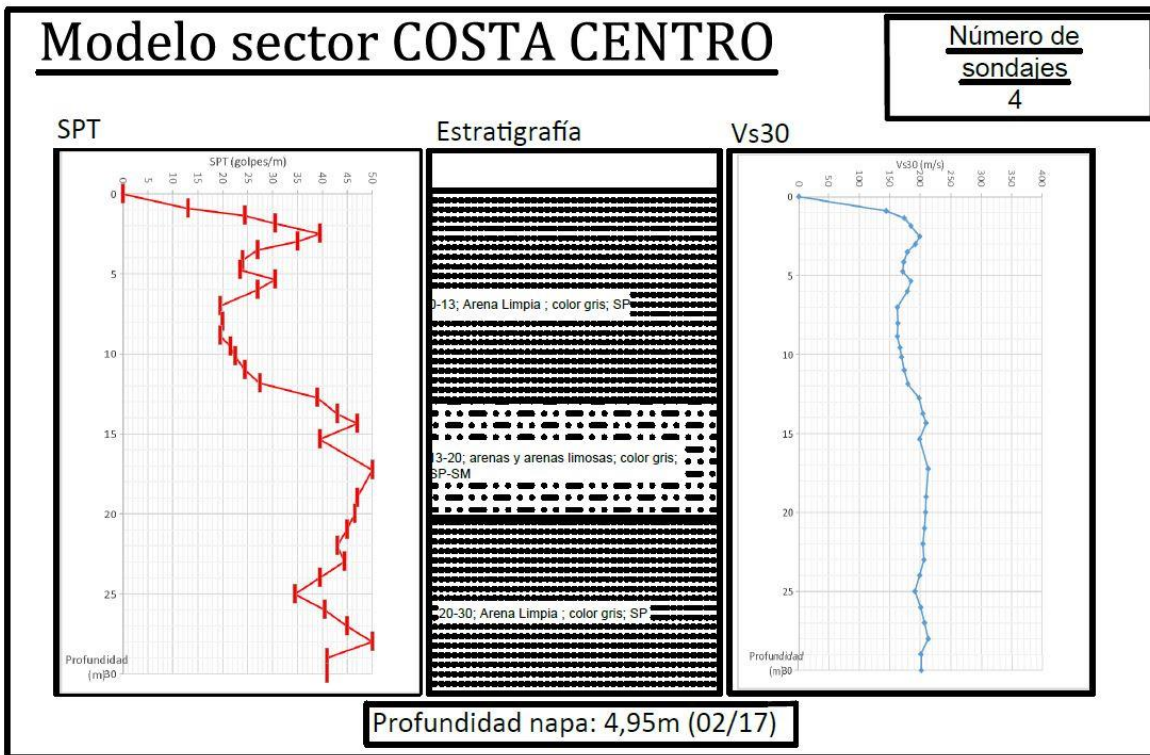


Ilustración 29: Modelo costa centro (elab.prop.)

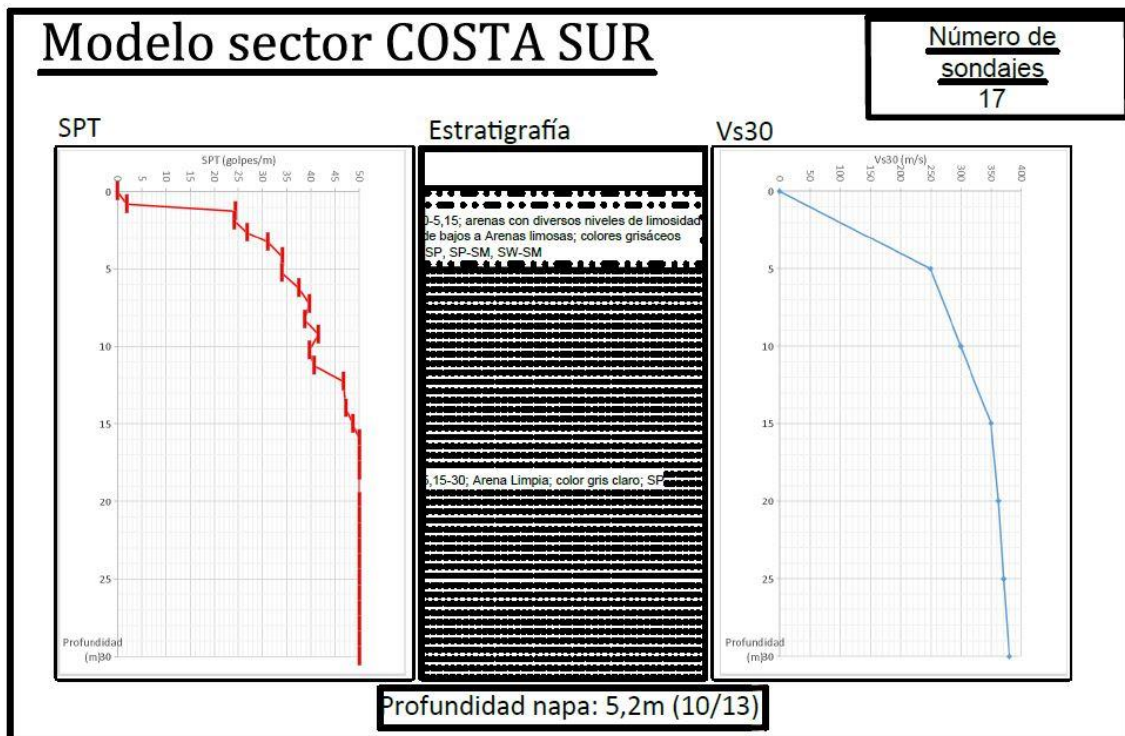


Ilustración 30: modelo costa sur (elab.prop.)

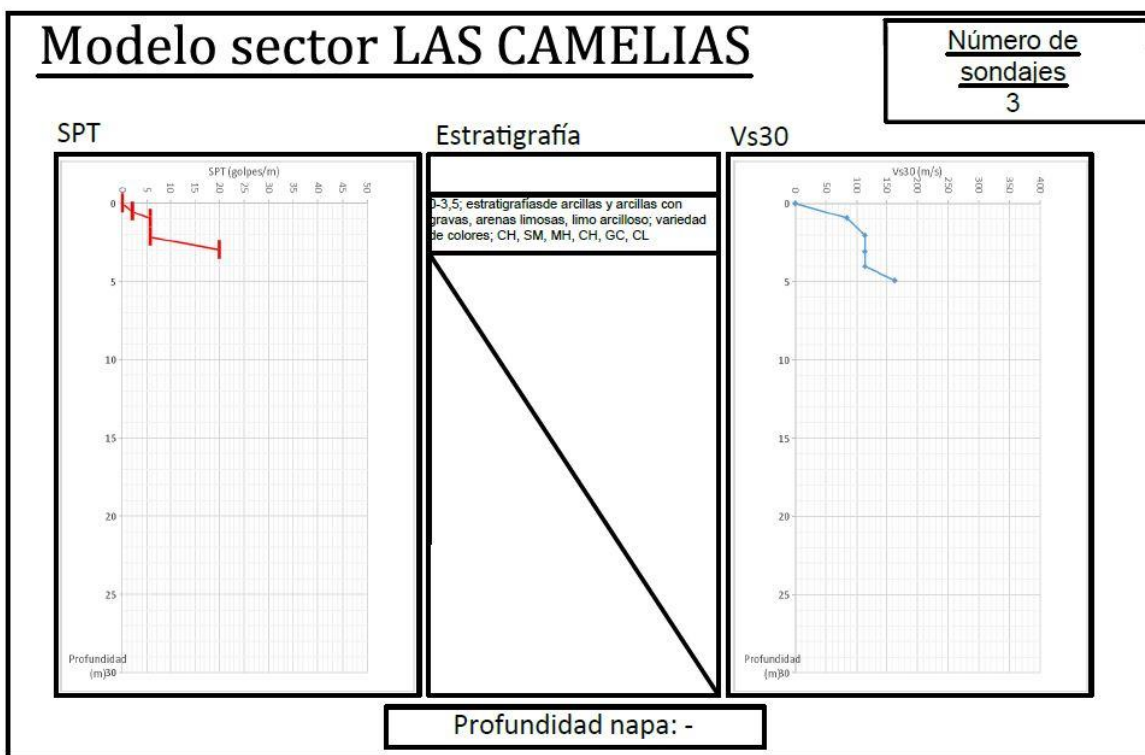


Ilustración 31: modelo las camelias (elab.prop.)

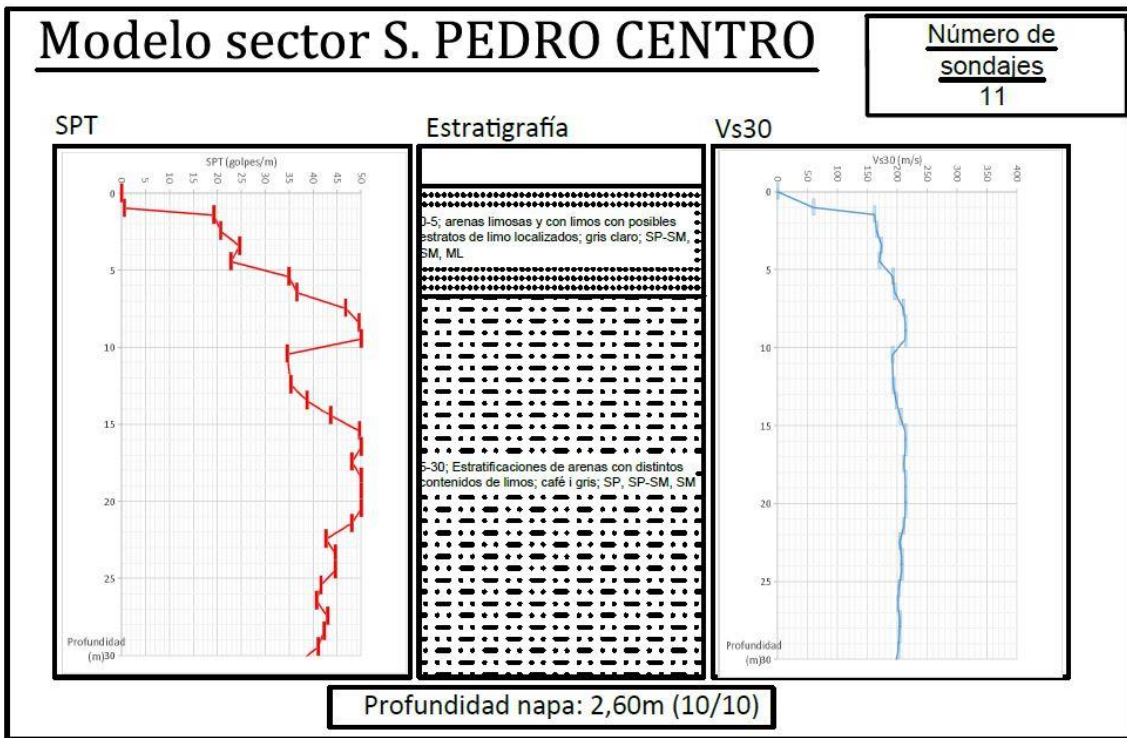


Ilustración 32: modelo san pedro centro (elab.prop.)

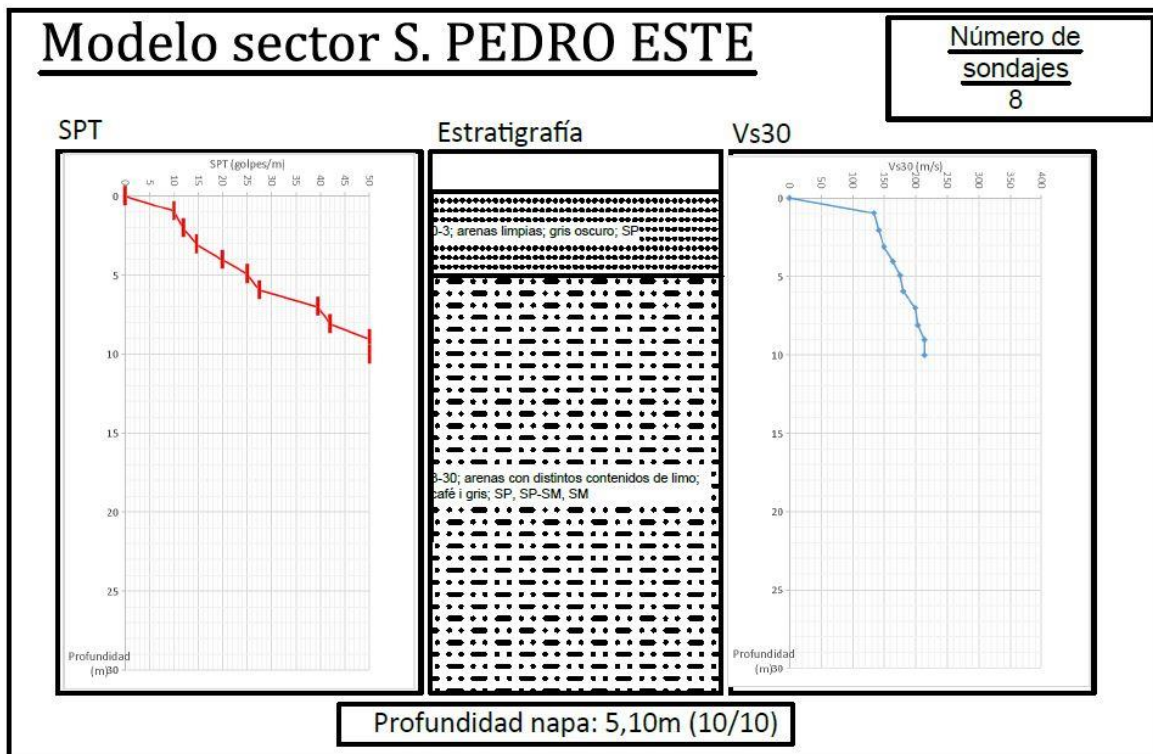


Ilustración 33: modelo San pedro este (elab.prop.)

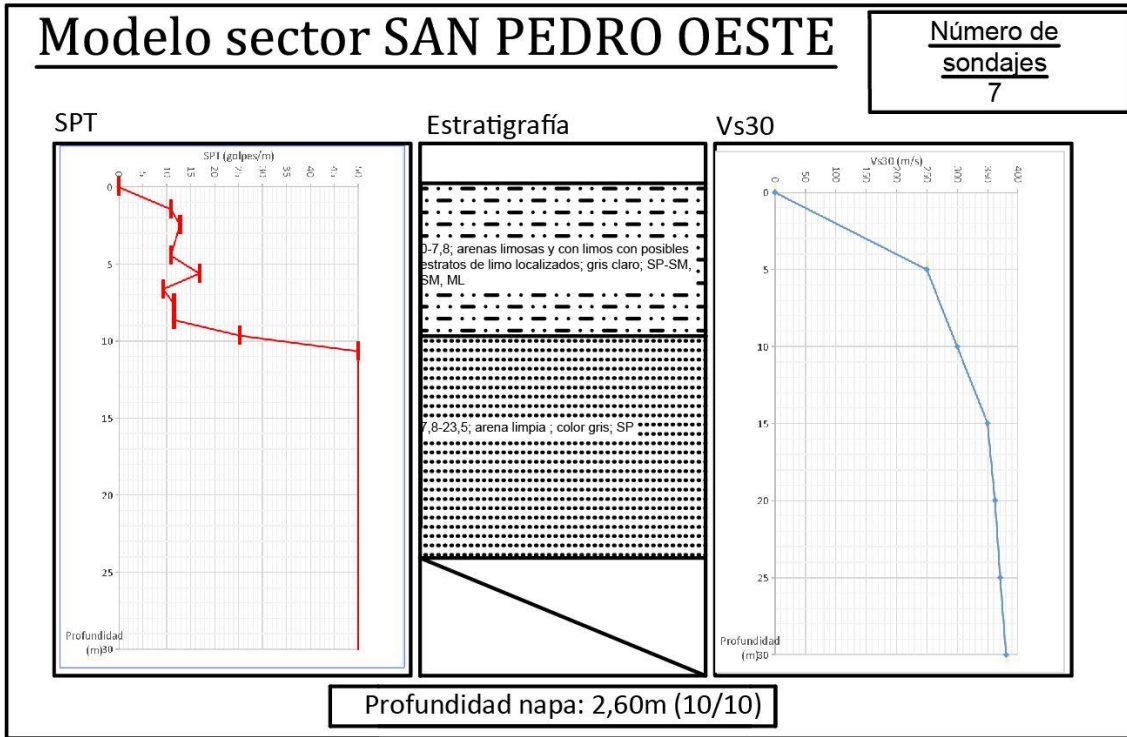


Ilustración 34: modelo san pedro oeste (elab.prop.)

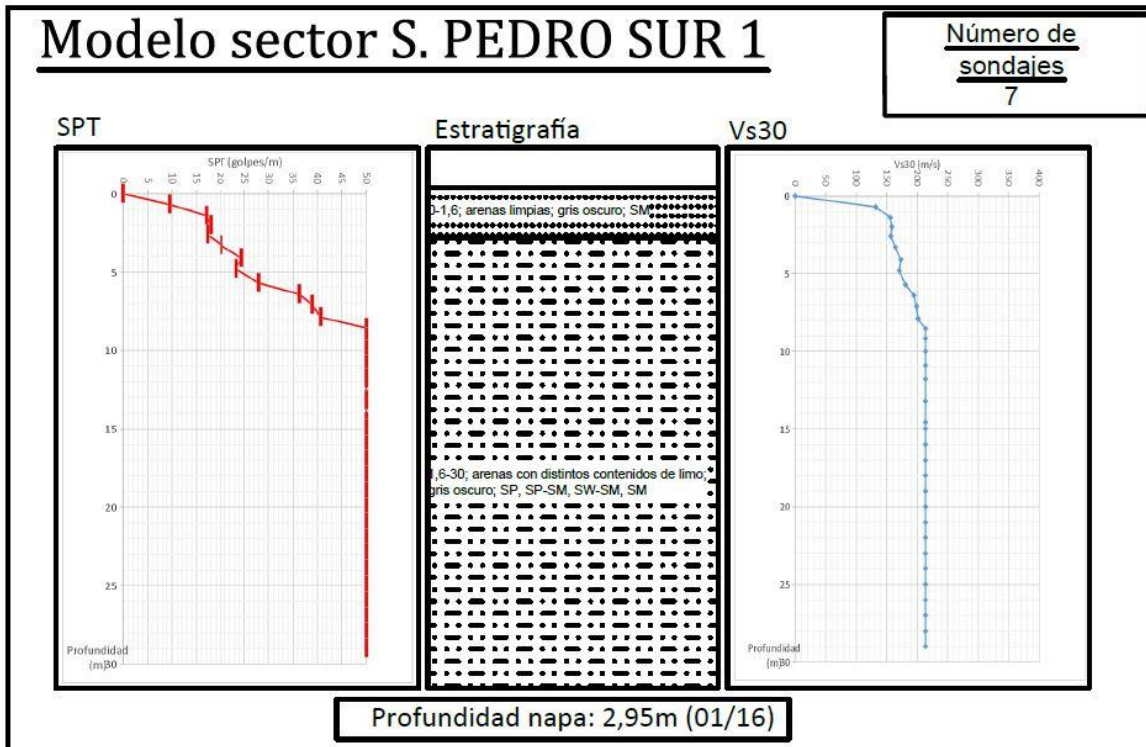


Ilustración 35: san pedro sur 1 (elab.prop.)

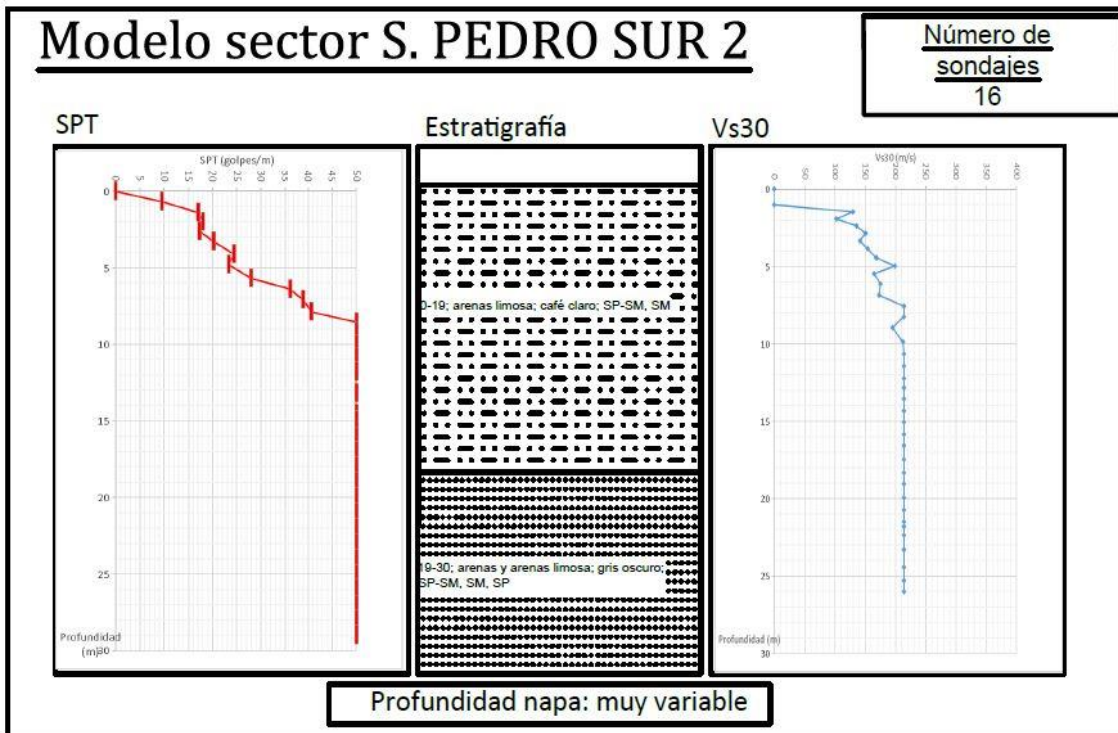


Ilustración 36: san pedro sur 2 (elab.prop.)

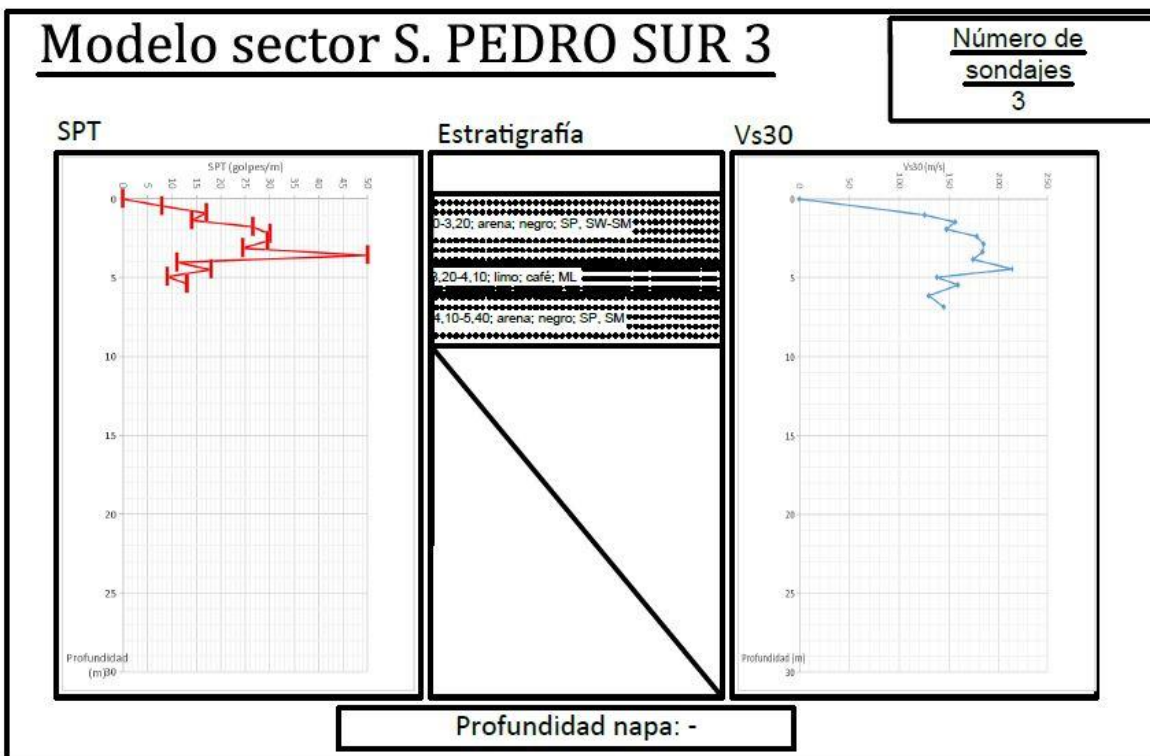


Ilustración 37: san pedro sur 3 (elab.prop.)

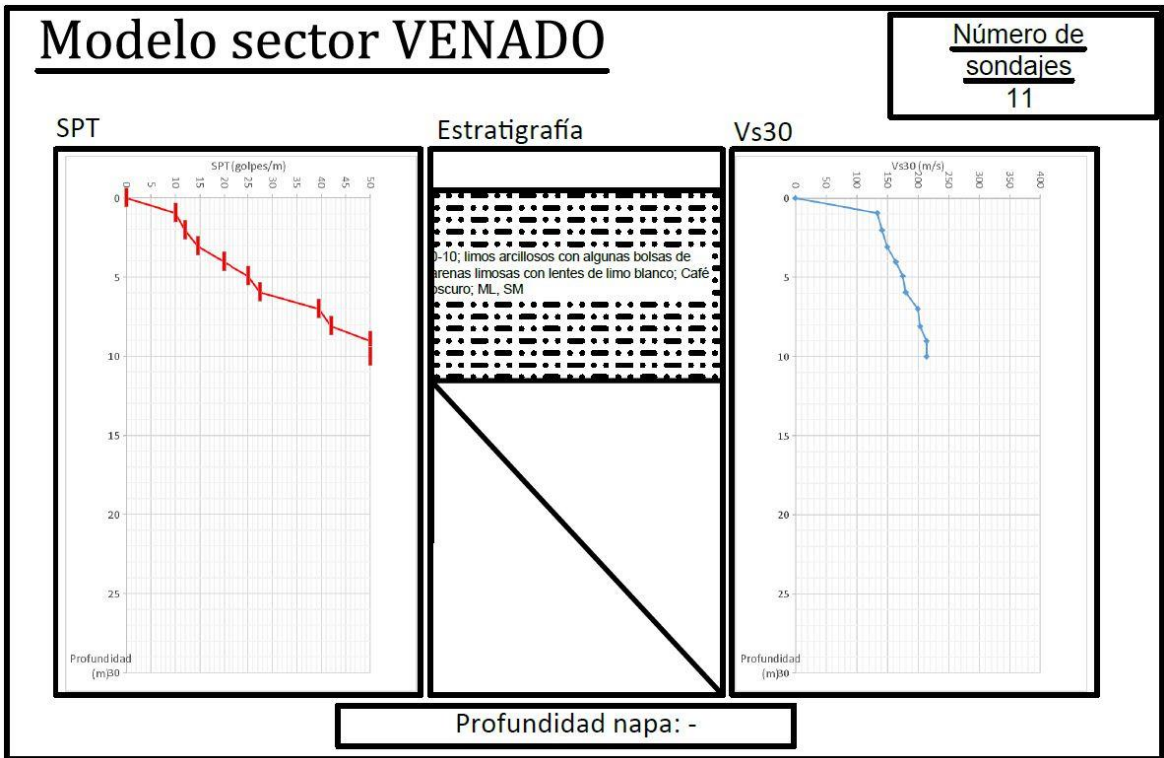


Ilustración 38: modelo el venado (elab.prop.)

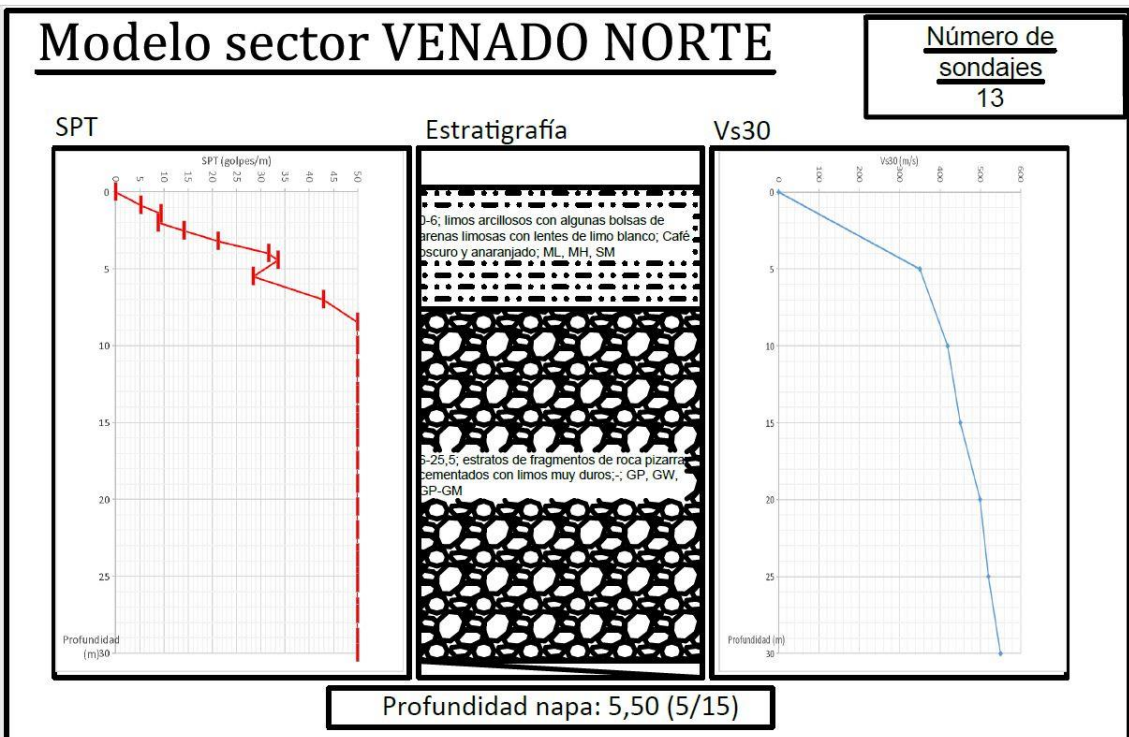


Ilustración 39: modelo venado norte (elab.prop.)

ANEXO 7: “Resultados segundo plano de zonificación”

En este anexo se encuentran los resultados del segundo plano de zonificación. Se presenta un plano indicador de las zonas y una ficha de cada zona definida con su información básica definida anteriormente.

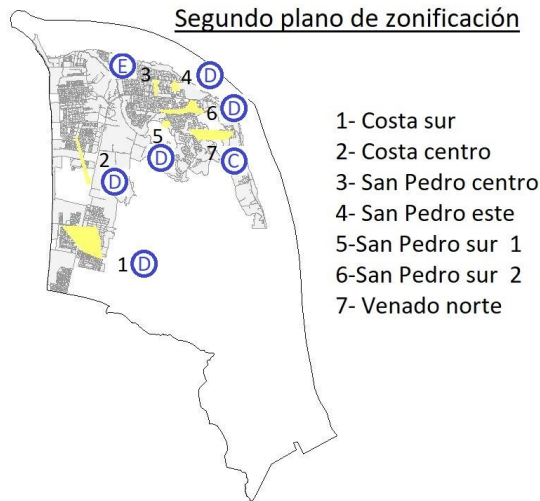


Ilustración 40: segundo plano zonificación (elab.prop.)

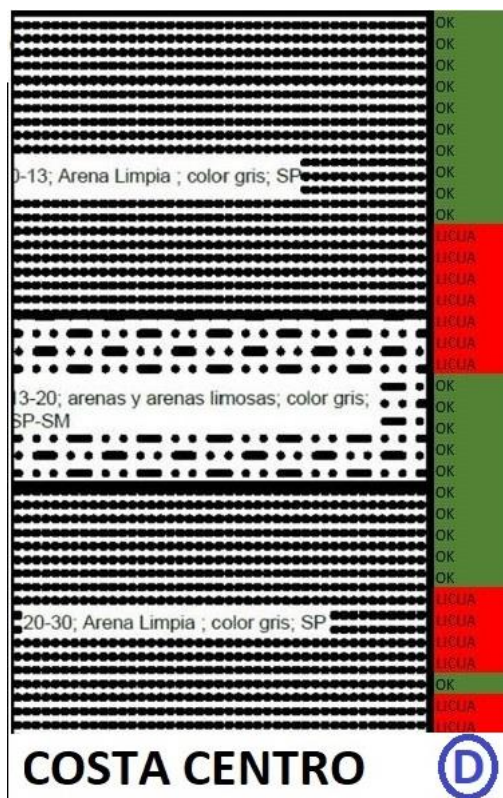


Ilustración 41: segundo plano costa centro (elab.prop)

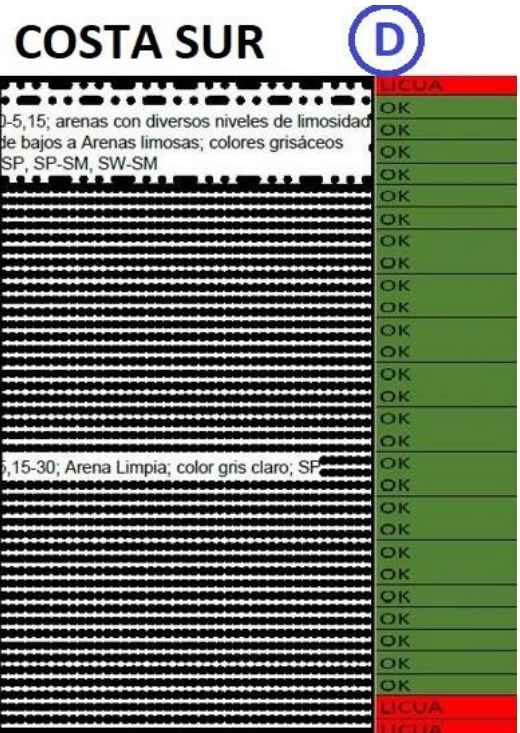


Ilustración 42: segundo costa sur (elab.prop.)

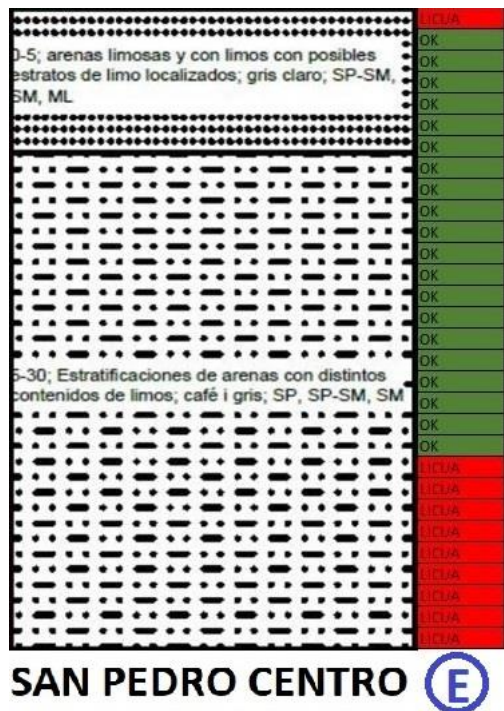


Ilustración 43: segundo san pedro centro (elab.prop.)

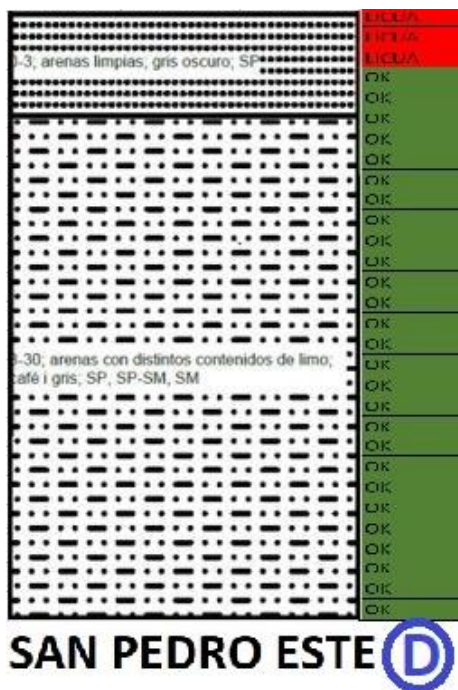


Ilustración 44: segundo san pedro este (elab.prop.)

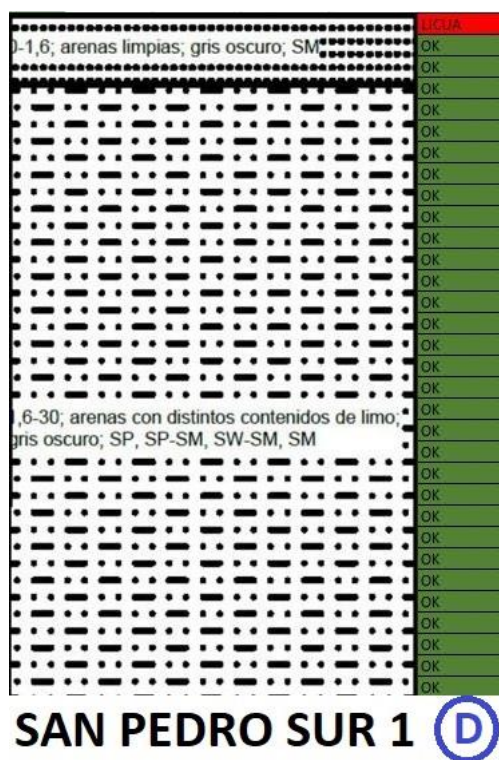


Ilustración 45: segundo san pedro sur 1 (elab.prop.)



Ilustración 46: segundo san pedro sur 2 (elab.prop.)

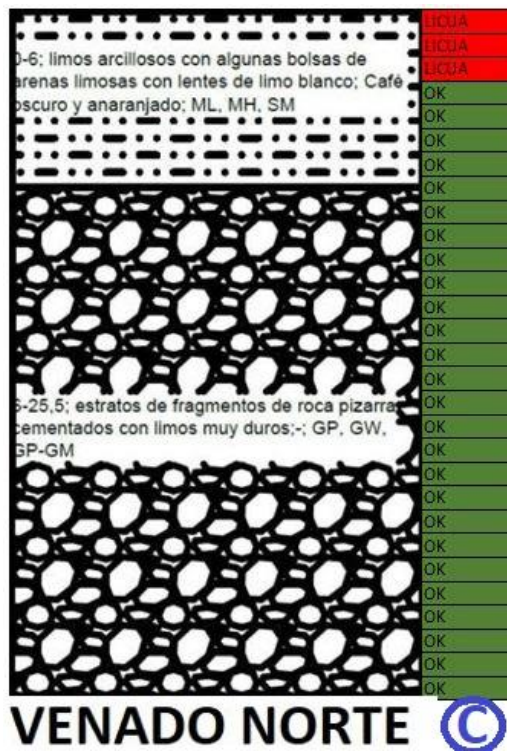


Ilustración 47: segundo venado norte (elab.prop.)