UNIVERSIDAD DE PIURA
REPOSITORIO INSTITUCIONAL PIRHUA

APLICACIÓN DEL SIG COMO HERRAMIENTA PARA LA PREVENCIÓN DE RIESGOS GEOTÉCNICOS EN LA CIUDAD DE PIURA

Fernando Ascencio-Saavedra

Piura, mayo de 2008

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Civil

Ascencio, F. (2008). *Aplicación del SIG como herramienta para la prevención de riesgos geotécnicos en la ciudad de Piura* (Tesis para optar el título de Ingeniero Civil). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.

Esta obra está bajo una licencia
Creative Commons Atribución-
NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú

Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura

U N I V E R S I D A D D E P I U R A

F A C U L T A D D E I N G E N I E R Í A

“Aplicación de SIG como herramienta para la prevención de riesgos geotécnicos en la ciudad de Piura”

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

José Fernando Ascencio Saavedra

Asesor: Ing. Wilfredo Castillo Castro

Piura, mayo 2008

A Dios,
mis padres,
hermanos, hermana
y a Rishima Bahadoorsingh.

Prólogo

La presente investigación nace como iniciativa del Laboratorio de Ensayo de Materiales de Construcción de la Universidad de Piura de contar con un medio que permita mantener, monitorear, comparar, analizar y conservar la información perteneciente a sus estudios de Mecánica de Suelos, de modo se pueda acceder de manera rápida y permita formular una concepción visual y analítica de la localización de aquellas exploraciones realizadas.

Esta tesis satisface estos requerimientos empleando los Sistemas de Información Geográfica, ubicando y localizando la información perteneciente a la parte urbana de la ciudad de Piura. De esta manera se da un primer paso que sirve como base para continuar la tarea de mantener, implementar y actualizar la data perteneciente a los trabajos realizados por el laboratorio dentro y fuera de la ciudad.

Como resultado del análisis de esta información se vio la necesidad de presentar una serie de factores de orden geológico como el proceso de formación del suelo piurano, niveles freáticos, entre otros, los cuales ponen de manifiesto a la ciudad de Piura como una ciudad que debe adoptar un plan de prevención de riesgos cara a su atenuación, mitigación y solución, desde el punto de vista de la Ingeniería Geotécnica.

Agradezco de manera muy especial a mi asesor Ing. Geólogo Wilfredo Castillo C. Jefe del Laboratorio de Ensayo de Materiales de Construcción y Catedrático de esta casa de estudios por el apoyo, información proporcionada e incentivo constante durante el periodo de investigación y elaboración de esta tesis.

Por último, también agradezco de manera personal a los ingenieros, compañeros de estudio y amigos Aldo Bayro V. y Frank Zapata G., pues fueron quienes me propusieron tomar esta investigación. Agradecimientos también, al personal que labora en este laboratorio, al futuro docente e investigador de esta universidad, Ing. José Ordinola E, a los profesionales que laboran dentro de la Unidad Operativa SIG de la UDEP y aquellas personas que de alguna manera aportaron al desarrollo de esta investigación.

Resumen

El objetivo de la tesis es emplear los Sistemas de Información Geográfica para la ayuda en el entendimiento y comprensión de la existencia de factores como la geomorfología, posición de la napa freática y condiciones del suelo que pueden inducir riesgo potencial en la ciudad de Piura, cara a su prevención y mitigación.

De esta forma, mediante el SIG creado en base a la información del Laboratorio de Ensayos de Materiales de Construcción y de datos de la red piezométrica del Centro de Drenaje y Recuperación de Tierras del año 1970 pertenecientes a la ciudad de Piura, se pudo definir mediante los SPT, perfiles de los depósitos del suelo y profundidades de niveles freáticos que la ciudad de Piura, debido a la composición litológica del suelo, presencia de napa freática alta y por estar dentro de un área de sismicidad histórica, es potencialmente susceptible de sufrir los fenómenos relacionados a la licuación.

Por esto, es conveniente seguir investigando a fin de elaborar un plan de prevención, considerando aquellos factores que inducen riesgos potenciales relacionados a la deformación del suelo en la ciudad de Piura.

Índice general

Prólogo

Resumen

Índice General

Índice de tablas

Índice de figuras

Introducción..... 1

Capítulo 1 Caracterización del área de estudio 3

1.1 Ubicación 3

1.2 Morfología 3

1.3 Climatología 4

1.4 Geología 4

1.5 Geotecnia 5

1.6 Sismicidad 6

1.7 Hidrogeología 6

Capítulo 2 Sistemas de Información Geográfica 9

2.1 Definición 9

2.2 Componentes de un SIG 9

2.3 Funciones requeridas para un SIG 10

2.4 Fuentes de datos requeridas para un SIG 10

2.5 Áreas de aplicación SIG 11

2.6 Beneficios de tener un SIG 12

2.7 Claves para un SIG exitoso 13

Capítulo 3 Sistematización de información 15

3.1 Proyección de mapas 15

3.1.1 Sistema de coordenadas geográficas 15

3.1.2 Esferoide y esfera 16

3.1.3 Datum 17
3.1.3.1 Datums geocéntricos 18
3.1.3.2 Datums locales 18
3.1.4 Sistema de coordenadas proyectadas 19
3.1.5 Proyección de mapas....19
3.1.5.1 Tipos de proyección 20
3.1.6 Universal Transver Mercator (UTM)....20
3.1.7 Sistema de coordenadas escogido 21
3.2 Fuentes para la sistematización de información 22
3.2.1 Informes del LEMC de la Universidad de Piura 22
3.2.1.1 Selección de información 23
3.2.1.2 Características de los informes....23
3.2.2 Tesis "Identificación de zonas con potencial de licuación en la ciudad de Piura con ensayos SPT"....24
3.2.2.1 Selección de información 25
3.3 Sistematización de información 25
3.3.1 Ubicación y localización de informes del LEMC 25
3.3.1.1 Metodología 26
3.3.2 Ubicación y localización de la información obtenida en la tesis del Ing. César Pinto Z.....28
3.3.3 Consideraciones 28
3.4 Estructura de datos 30

Capítulo 4 Análisis mediante SIG 33
4.1 Geomorfología del área de estudio 34
4.2 Profundidad del nivel freático 34
4.2.1 Relación entre la geomorfología del área y las profundidades del nivel freático....36
4.3 Dirección del flujo de agua....36
4.3.1 Relación entre la geomorfología del área y los niveles de napa freática....38
4.4 Potencial de licuación....40

Capítulo 5 Identificación mediante SIG de nuevas zonas con potencial de licuación....43
5.1 Fenómenos relacionados a la licuación 44
5.1.1 Flujo por licuación 44
5.1.2 Movilidad cíclica 45
5.2 Susceptibilidad a la licuación 45
5.2.1 Criterios históricos 45
5.2.2 Criterios geológicos 46
5.2.3 Criterios de composición 46
5.2.4 Criterios de estado 48

5.2.4.1 Relación de vacíos crítica....48
5.2.4.2 Estado constante de deformación....49
5.2.4.3 Parámetro de estado....49
5.3 Iniciación de la licuación....49
5.3.1 Superficie de flujo por licuación....50
5.3.1.1 Carga uniforme....50
5.3.1.2 Carga cíclica....51
5.3.1.3 Desarrollo del flujo por licuación....52
5.3.2 Influencia del exceso de presión de poros....53
5.3.2.1 Flujo por licuación....53
5.3.2.2 Movilidad cíclica....54
5.4 Evaluación del potencial de licuación....54
5.4.1 Enfoque de esfuerzo cíclico....54
5.4.1.1 Caracterización de la carga sísmica....55
5.4.1.2 Caracterización de la resistencia a la licuación....56
5.4.1.3 Evaluación del potencial de licuación....60
5.4.2 Enfoque de deformación cíclica....60
5.5 Procedimiento para la evaluación del potencial de licuación....61
5.6 Evaluación del riesgo potencial de licuación en el área de estudio....61
5.6.1 Elección de la magnitud y la aceleración sísmica....62
5.6.2 Elección de la profundidad del nivel freático....62
5.6.3 Análisis del riesgo potencial de licuación....62
5.6.4 Resultados del análisis del riesgo potencial de licuación....63
5.7 Comentarios....63

Conclusiones....67

Bibliografía....69

Anexo A....71
Plano N1....I
Plano N2....II
Plano N3....III
Plano N4....IV
Plano N5....V
Plano N6....VI
Plano N7....VII
Plano N8....VIII

Anexo B **80**
Tabla B-1..... II-III
Tabla B-2..... IV-V
Tabla B-3..... VI

Anexo C **84**
Tabla C-1..... I-II

Índice de tablas

Tabla 2.1 Principales áreas de aplicación SIG 12
Tabla 2.2 SIG Vs Procedimientos manuales 13
Tabla 3.1 Diferencias entre datums NAD 1983 y NAD 1927 18
Tabla 3.2 Diferencia entre Datum NAD 1983 y WGS 1984 [5] 18
Tabla 3.3 Herramientas empleadas para localización. Google Earth 27
Tabla 5.1 Susceptibilidad a licuación según el tipo de depósito del suelo 47
Tabla 5.2 Valores límite para suelos de grano fino que pueden ser considerados susceptibles a pérdida significativa de esfuerzos 47
Tabla 5.3 Factor de corrección , C_r 57
Tabla 5.4 Factor de corrección de magnitud para el enfoque de esfuerzo cíclico 60
Tabla 5.5 Resumen de resultados. Análisis del nivel freático obtenidos de los SPT y aceleración máxima 7.5. 64
Tabla 5.6 Resumen de resultados. Análisis del nivel freático elevado y aceleración máxima 7.5. 65
Tabla 5.7 Selección de zonas para pruebas de campo SPT 66
Tabla 5.8 Resultados de pruebas SPT 66

Índice de figuras

Figura 1.1 Mapa referencial de ubicación, ciudad de Piura 4
Figura 2.1 Funciones básicas SIG 10
Figura 2.2 Principales fuentes de datos para un SIG 11
Figura 3.1 Representación de la Tierra divida en meridianos y paralelos 16
Figura 3.2 a) esfera, b) esferóide 16
Figura 3.3 Datum local y geocéntrico 19
Figura 3.4 Distorsión en el proceso de proyección de mapas 19
Figura 3.5 Tipos de proyección a) cónica, b) cilíndrica y c) plana 20
Figura 3.6 Sistema UTM 21
Figura 3.7 Profundidades de napa freática 26
Figura 4.1 Sección esquemática 1-1´. Plano N3 35
Figura 4.2 Perfil esquemático 1-1´. Plano N6 37
Figura 4.3 Perfil esquemático 2-2´. Plano N6 37
Figura 4.4 Perfil esquemático 3-3´. Plano N6 38
Figura 4.5 Perfil esquemático 4-4´. Plano N6 38
Figura 4.6 Perfil esquemático 5-5´. Plano N7 40
Figura 4.7 Perfil esquemático 6-6´. Plano N7 41
Figura 5.1 Falla por flujo. 44
Figura 5.2 Movilidad cíclica 45
Figura 5.3 Relación entre la distancia epicentral en zonas donde se ha observado licuación y la magnitud de momento superficial 46
Figura 5.4 a) esfuerzo-deformación, b) esfuerzo desviador-relación de vacíos 48
Figura 5.5 Empleo de línea CVR como límite entre estados iniciales de suelos que son susceptibles o no a licuación por flujo 48
Figura 5.6 Empleo de línea SSL como límite entre suelos susceptibles a flujo por licuación 49
Figura 5.7 Parámetro de estado “Ψ” 50

Figura 5.8 Respuesta de una muestra de suelo consolidado isotrópico de arena suelta saturada.- a) curva Esfuerzo-Deformación, b) camino de esfuerzos efectivos, c) exceso de presión de poros, d) presión efectiva de confinamiento 51
Figura 5.9 El flujo por licuación en muestras de suelo 52
Figura 5.10 Superficie de licuación por flujo 52
Figura 5.11 Iniciación de licuación por carga uniforme y cíclica 53
Figura 5.12 Zona susceptible a flujo por licuación.....53
Figura 5.13 Zona susceptible a movilidad cíclica.....54
Figura 5.14 Número de ciclos equivalentes, N_{eq}, para sismos de diferente magnitud.....55
Figura 5.15 Factor de reducción de esfuerzos, r_d 56
Figura 5.16 Relación entre límites de esfuerzos cíclicos que causan licuación y valores N_1 en arenas limosas para un sismo de magnitud M = 7.5.....58
Figura 5.17 Factor de corrección de sobrecarga, C_N 59
Figura 5.18 Valores N críticos para SPT.....59

Introducción

La aplicación de los Sistemas de Información Geográfica en las ciencias relacionadas a la Ingeniería es utilizada a nivel mundial para la determinación de factores o fuentes que incitan riesgos; y de esta manera poder prevenirlos, atenuarlos y de ser posible mitigarlos.

En el presente estudio se ha creído conveniente aplicarlos a la Ingeniería Geotécnica como herramienta de apoyo al investigador en el entendimiento de factores como la posición de la napa freática, condiciones del suelo, etc., que pueden inducir riesgos potenciales.

El proceso de investigación ha sido dividido en cinco capítulos, según se describen a continuación:

En el primer capítulo se caracteriza el área en estudio. En el segundo se introduce el marco teórico perteneciente a los Sistemas de Información Geográfica como herramienta contemporánea útil, por su versatilidad de poder descomponer en niveles temáticos el medio donde se desarrollan las actividades relacionadas a la ingeniería.

El tercer capítulo proporciona ciertas pautas previas a la creación de un Sistema de Información Geográfica, con la finalidad de poder escoger el sistema de coordenadas apropiado, según nuevas investigaciones y mediciones geodésicas realizadas a nivel mundial. Así mismo, se describe la metodología empleada por el tesista para ubicar y localizar espacialmente los SPT, calicatas y red piezométrica del año 1970.

Una vez sistematizada la información dentro del SIG, se presenta en el cuarto capítulo el análisis correspondiente a la data estructurada, para determinar aquellos sondeos que por sus condiciones, inducen riesgo potencial de deformación al suelo.

Como resultado del análisis, en el quinto capítulo se presenta el marco teórico perteneciente a los fenómenos relacionados a la licuación. Posteriormente, se analiza aquellos sondeos observados con ayuda de los SIG y que presentan riesgo potencial de licuación.

Por último, se formulan las conclusiones y una serie de recomendaciones básicas para cualquier proyecto a realizarse a futuro en la ciudad de Piura y en el ámbito regional.

Capítulo 1

Caracterización del área de estudio

1.1 Ubicación

La ciudad de Piura se encuentra ubicada a la margen derecha del río Piura. Políticamente pertenece al distrito y provincia de Piura, dentro del departamento del mismo nombre, a unos 1000 km de la capital, Lima.

El distrito de Piura, donde se encuentra ubicada la ciudad de Piura, limita con los siguientes distritos: por el norte, con Sullana; sur, con Catacaos; este, con Castilla y por el oeste, con Miguel Checa.

A continuación se presenta las coordenadas geográficas de los puntos extremos del área de estudio:

E. Superior	5.162787° S	80.625793° W
E. Inferior	5.210010° S	80.634166° W
E. Izquierdo	5.173867° S	80.688824° W
E. Derecho	5.195082° S	80.624499° W

La figura 1.1 presenta el esquema de ubicación geográfica de la ciudad de Piura.

1.2 Morfología

La morfología de la zona es típica de la costa peruana, contando con extensas pampas semidesérticas, de topografía plana o suavemente ondulada que se extienden desde el mar hasta los primeros contrafuertes andinos y delimitada por el transcurso de su afluente principal, el río Piura.

El casco antiguo de la ciudad de Piura (centro de la ciudad) tiene como cota promedio 30 msnm, en tanto el sector oeste (salida hacia Sullana y Paita) se encuentra a 35 msnm. Las zonas más bajas corresponden al sector sur (salida hacia la Legua) con cota promedio de 27 msnm, mientras que el sector norte de la ciudad (camino a los Ejidos) presenta una cota aproximada de 38 msnm. La pendiente general tiene una dirección Noroeste – Sudeste; tendencia general, ligada a la dirección y ubicación del río Piura.

1.3 Climatología

El clima de la zona de estudio varía de cálido a semicálido, presentando las siguientes condiciones:

Temperatura: Varía entre los 16º C (agosto – setiembre) y 34º C (febrero – marzo).
Presión atmosférica: Varía entre los 1009 mb (enero) y 1016 mb (setiembre).
Humedad relativa: Varía entre el 67% (enero – marzo) y 75% (agosto – setiembre).

La precipitación pluvial es un fenómeno muy irregular de un año a otro, dependiendo principalmente del comportamiento de las corrientes marinas de Humbolt y El Niño.

Se conoce con el nombre del Fenómeno El Niño (FEN) a la aparición de corrientes oceánicas en las costas del Océano Pacífico de América del Sur, durante el verano del hemisferio sur.

A la aparición y desplazamiento del máximo de temperatura se le ha nombrado recientemente "episodio cálido" y al sube -y- baja de la presión, Oscilación del Sur. Modernamente se nombra a este fenómeno como ENOS [1] (El Niño Oscilación del Sur), denotando con ello el conjunto de alteraciones en los patrones normales de circulación del océano y la atmósfera.

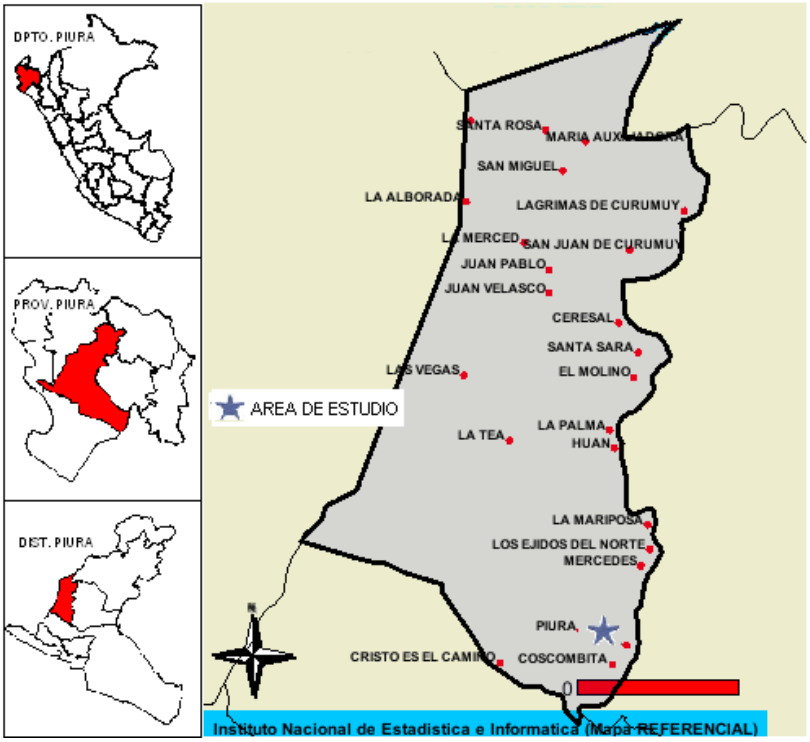


Figura 1.1 Mapa referencial de ubicación, ciudad de Piura [2]

1.4 Geología [3]

El área estudiada se encuentra comprendida dentro de la cuenca Sechura, donde se ha reconocido un espesor de 2400 m de sedimentos que descansan sobre un basamento

[1] Fuente: Centro peruano de estudios rurales
[2] Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática
[3] Fuente: Palacios O. "Geología de los cuadrángulos de Paita, Piura, Talara, Sullana, Tumbes"

metamórfico muy antiguo. Las formaciones reconocidas en campo pertenecen al Cuaternario Reciente, Terciario, Cretáceo y Paleozoico Inferior (Complejo Basal de la Costa). Según la geología estructural, la zona en estudio participa de una malla de fallas producto de los movimientos tectónicos de fines del Terciario hasta el Cuaternario y que ha devenido en tener una superficie frágil, susceptible a los movimientos vibratorios producto del paso de las ondas sísmicas.

En cuanto a la geología local, la ciudad de Piura se encuentra en el extremo norte de la Cuenca Sechura. Su estratigrafía corresponde a una secuencia de sedimentos dispuestos en alternancia de rocas, que van desde el Cuaternario Reciente al Terciario Superior Mioceno, emplazados sobre rocas del Cenozoico con basamento en el Complejo Metamórfico de la Costa.

El Cuaternario Reciente está constituido por depósitos aluviales y eólicos extendidos por las márgenes, terrazas y zonas aledañas al río Piura. Subyaciendo a estos depósitos se tiene el elemento más importante de la pila sedimentaria, la formación Zapayal, perteneciente al Terciario Mioceno y con una potencia estimada de 600 m. aflora a lo largo de la margen izquierda del río Piura desde la presa Los Ejidos y en la parte oeste de la ciudad hacia la Zona Industrial. Estos afloramientos constituyen el piso superior del Zapayal y están compuestos por lentes de limotita y arenisca sin estratigrafía continua; mientras que el piso inferior está conformado por lutitas y lutitas bentoníticas con abundante yeso, pirita y diatomeas.

La formación Montero, infrayaciente al Zapayal, está compuesta por arenas, conglomerados arenosos y lutitas. Por debajo de estas formaciones, se tiene las rocas del Paleozoico con una potencia estimada de 1700 m.

1.5 Geotecnia

El suelo, en la llanura desértica de la costa, es el resultado de la acción conjunta de los ríos y vientos. El material erosionado en las partes altas de las cuencas es depositado en el área de inundación de los ríos. Estas llanuras aluviales, se encuentran delimitadas en ambas márgenes por depósitos eólicos transportados desde las playas marinas, formando dunas y mantos que constituyen la cobertura superficial.

En cuanto a la geotecnia local, existen dos grandes cursos aluviales de recorrido aproximadamente paralelo. Uno de ellos lo constituye el actual cauce del río (río Piura) y el otro es un antiguo lecho del río (paleocauce) que se identifica superficialmente por constituir una franja topográficamente baja que atraviesa la Urb. Santa Isabel, Pachitea, Mercado Modelo, Urb. Grau, Urb. 04 de Enero y llega finalmente al anteriormente conocido Barrio Sur. Las zonas situadas fuera de estos cursos aluviales tienen predominancia de material eólico y en general están ubicadas en el oeste de Piura.

Los depósitos eólicos son irregulares, de variada extensión, espesor, calidad de material, compacidad y permeabilidad. Los depósitos aluviales están compuestos de limos arenosos y arena pobremente graduada con lentes de limo y arcillas. Los depósitos eólicos están formados por arenas con presencia de limos y arcillas. Por debajo de las cotas 21 y 23 msnm se encuentra una capa arcillosa compacta e impermeable de 4 a 6 m de espesor, que se extiende por debajo de gran parte de la ciudad. Por encima de esta capa impermeable se encuentra la napa freática de agua salobre.

1.6 Sismicidad

Piura forma parte del llamado "Gran Cinturón de Fuego del Pacífico", una franja sísmica muy activa en el cual se detecta más del 75 % de la sismicidad total del globo. La sismo tectónica nos indica que la región está sometida a los esfuerzos derivados del contacto de la Placa de Nazca (oceánica) y la placa Sudamericana (continental).

La placa Sudamericana crece de la cadena Meso-Oceánica del Atlántico, avanzando hacia el Noroeste con una velocidad de 2 a 3 cm por año y se encuentra con la Placa de Nazca en su extremo occidental, constituida por la costa Sudamericana del Pacífico. Así mismo, la Placa de Nazca crece de la cadena Meso-Oceánica del Pacífico Oriental y avanza hacia el este con una velocidad aproximada de 5 a 10 cm por año, subyaciendo debajo de la Placa Sudamericana con una velocidad de convergencia de 7 a 12 cm por año. La convergencia de estas dos placas constituye una zona de subducción, llamada Zona de Benioff. Como consecuencia de la interacción de las dos placas convergentes han sido formadas la Cadena Andina y la Fosa Perú-Chile.

En las áreas costeras, por estar más cerca de la zona de Benioff, los focos suelen ser superficiales y conforme se avanza hacia el continente pasan a ser intermedios y profundos.

En cuanto a la sismicidad de la Región, se ha caracterizado la Sismo tectónica de la región, presentando determinadas fallas que se describen a continuación:

- Falla de Huaypirá, al norte de Sullana, con rumbo E-O y un buzamiento fuerte hacia el sur. No tiene características de ser activa, sin embargo, ya que es una de las mayores estructuras del Noroeste peruano, es probable que se haya movido en el Cuaternario. Su longitud es de 70km y puede producir terremotos de 7 a 7.65 grados de magnitud, según mapas epicéntricos del Instituto Geofísico del Perú (IGP).

- Falla de Illescas, no activa, se ubica entre el Macizo de Illescas y la cuenca de Sechura. Tiene rumbo N150ºE y buzamiento sub-vertical.

1.7 Hidrogeología

El agua subterránea en las zonas aledañas al río Piura se encuentra en una amplia gama de condiciones, la cual depende en gran medida de las características del subsuelo. Generalmente cuanto más profundos sean los estratos, el agua contenida constituirá acuíferos confinados, mientras que para estratos menos profundos, es posible tener acuíferos superficiales. En las zonas alejadas al valle se ha determinado que las rocas permeables de los estratos del Terciario (formación Zapayal) son los más importantes en el suministro de agua subterránea. En las zonas cercanas al valle, se tiene un acuífero superficial y confinado parcialmente por estratos impermeables.

Los niveles de la napa freática de la ciudad de Piura se extienden a través de los depósitos aluviales y eólicos recientes que pueden alcanzar un espesor de 15 m y que tienen como límite inferior la formación Zapayal.

En general la napa freática sigue la dirección de la pendiente del terreno en un flujo tangencial hacia el río Piura, el cual funciona como un dren para periodos de estiaje. La napa recibe su recarga de forma local, por filtraciones de riego y alcantarillado, aunque en su mayor parte lo hace por las lluvias, las grandes avenidas del río Piura y las derivaciones de las bocatomas de Poechos y San Lorenzo.

Capítulo 2

Sistemas de Información Geográfica

2.1 Definición

Se define como Sistema de Información Geográfica (**SIG** o **GIS**, en su acrónimo inglés) a un sistema creado para la captura, almacenamiento, análisis y manejo de datos, cuya información está espacialmente referida a la superficie terrestre. En un sentido más genérico, un SIG es una herramienta que permite a los usuarios crear preguntas interactivas, analizar información espacial, editar datos, mapas y poder presentar los resultados de todas estas operaciones.

2.2 Componentes de un SIG

Los componentes claves de un SIG son un sistema informático, datos geográfico-espaciales y los usuarios.

- Sistema informático.- Compuesto de hardware, software y procedimientos diseñados para manejar la captura de datos, el procesamiento, el análisis, el modelado y la visualización de datos geográfico-espaciales.

- Datos.- Es información proveniente de mapas digitalizados, fotografías aéreas, imágenes satelitales, tablas estadísticas y otros documentos relacionados. Estos se clasifican en datos gráficos y de atributos.

    a) Datos gráficos o geométricos.- Estos datos se clasifican en datos vectoriales y datos raster. Los datos vectoriales pueden ser representados mediante tres elementos: punto (o nodo), línea (o arco) y área (o polígono); mientras que el raster es representado por una cuadrícula con celdas de igual tamaño. De esta manera, ambos, pueden representar la topología, tamaño, forma, posición y orientación de un elemento.
    b) Atributos.- Es un tipo de presentación de información asociada a una base de datos que contienen una serie de filas y columnas, donde cada fila o expediente está relacionada a un elemento geográfico y cada columna o campo describe un atributo en particular de los elementos.

- Usuarios.- Se entiende como usuario, no sólo al grupo de gente que utilizará este sistema como herramienta para el análisis geográfico-espacial, si no también, al

grupo de personas cuyo rol es seleccionar la información pertinente, fijar los estándares necesarios, diseñar esquemas de actualización eficientes en términos de costos, analizar las salidas gráficas para propósitos relevantes y planificar la adquisición de nuevos softwares, que estén a la medida de los requerimientos del trabajo. Sin embargo, para los fines de esta tesis, los usuarios serán quienes utilizarán esta herramienta para el almacenamiento, visualización, conservación y análisis de información.

2.3 Funciones requeridas para un SIG

Las funciones que un SIG debe cumplir están enfocadas a responder preguntas que pueden ser enmarcadas dentro de los siguientes puntos:

- ¿Qué hay en ...? Pregunta de ubicación: que existe en una determinada ubicación.
- ¿Dónde está ...? Pregunta condicional: que ubicaciones satisfacen ciertas solicitaciones.
- ¿Cómo ha cambiado ...? Pregunta de tendencia: identifica la ocurrencia geográfica o las tendencias que han cambiado o que se encuentran en el proceso de cambio.
- ¿Qué datos están relacionados ...? Pregunta relacional: analiza el vínculo espacial entre objetos de características geográficas.
- ¿Qué pasa si ...? Pregunta basada en el modelo: Calcula y exhibe un camino óptimo, un terreno adecuado, un área de riesgo de desastres, etc.

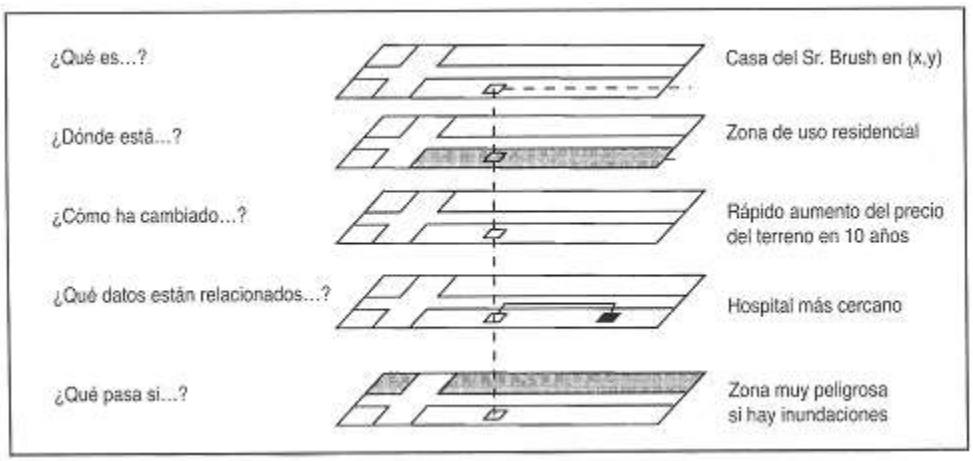


Figura 2.1 Funciones básicas SIG [4]

2.4 Fuentes de datos requeridas para un SIG

Dado que la adquisición o la entrada de datos "geo-espaciales" en formato digital es lo más costoso (aproximadamente 80% del costo total del proyecto SIG) y debido que el proceso de generación de un SIG consume tiempo de máquina; las fuentes para la adquisición de datos deben ser seleccionadas cuidadosamente para propósitos específicos.

- Fotografías aéreas.- La fotogrametría analítica, que fue la primera en desarrollarse y la fotogrametría digital que nace con los ordenadores son costosas, pero que se convierten en el mejor método para la conformación de un SIG. Sustituyendo de esta manera la imagen analógica por la imagen digital.

[4] Fuente: Murai, S "SIG, Manual base – conceptos fundamentales"

- Mapas analógicos.- Los mapas topográficos con líneas de contorno y otras características del terreno, mapas temáticos referidos a otra clase de objetivos como zonas protegidas, áreas de reforestación, mapas geológicos, etc., son actualizados manualmente por digitalizadores o semi-automáticamente por escáneres. Sin embargo, la mayor dificultad de los mapas analógicos es la falta de disponibilidad, antigüedad, inexactitud e inconsistencia en el tiempo de producción, lo que complica la actualización de dicha información.

- Imágenes satelitales.- Una imagen satelital es la representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial sobre la Tierra. Estos sensores recogen información que procesada convenientemente entrega valiosa información sobre las características de la zona representada.

- Levantamiento terrestre con GPS.- Las estaciones totales junto con GPS o Sistemas de Posicionamiento Global están modernizando el levantamiento terrestre, presentando datos localizados espacialmente y su respectiva elevación en base a un punto determinado.

- Informes y publicaciones.- Mayormente referidos a unidades de administración, como los datos socio-económicos que son normalmente listados en los informes de estadística y censo,

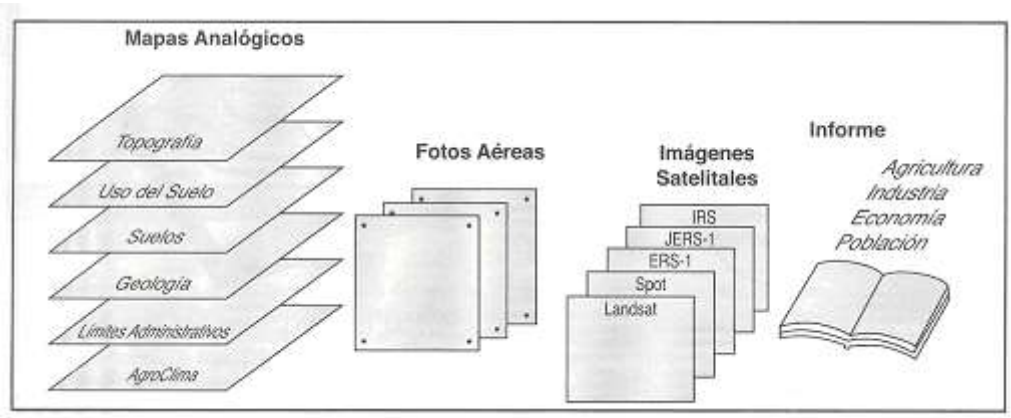


Figura 2.2 Principales fuentes de datos para un SIG [4]

2.5 Áreas de aplicación SIG

Las principales áreas de aplicaciones SIG pueden ser agrupadas en las siguientes cuatro categorías:

a) Manejo de instalaciones: Para el manejo de instalaciones se utilizan principalmente mapas precisos a gran escala y análisis de redes. El sistema AM/FM ("Automated Mapping/Facilities Managment") es usado frecuentemente en este campo.

b) Manejo de medio ambiente, recursos naturales y ambientales: Para el manejo de recursos naturales, ambientales y el análisis de impacto ambiental, se utilizan mapas a una determinada escala, empleando técnicas de superposición en combinación con fotografías aéreas e imágenes satelitales.

[4] Fuente: Murai, S. "SIG, Manual base – conceptos fundamentales"

c) Red de calles: Se utilizan mapas a gran o mediana escala y análisis espacial para determinación de rutas de vehículos, ubicación de casas, calles, etc.

d) Sistema de información de tierras: Para administración de catastro, fijación de impuestos, etc., se utilizan mapas catastrales a escalas convenientes, junto a mapas de parcelas de tierras y análisis espacial.

La tabla 2.1 resume las principales áreas de aplicación SIG

Tabla 2.1 Principales áreas de aplicación SIG [4]

AREA	APLICACIONES SIG
Manejo de instalaciones	Ubicación de cañerías y cables subterráneos Planificación y mantenimiento de instalaciones Servicio de redes de telecomunicaciones Seguimiento y planificación de uso de energía
Manejo de Medio Ambiente RRNN y RR Ambientales	Estudio de aptitud para cosechas agrícolas Manejo de bosques, tierras agrícolas Recursos hídricos, zonas inundadas, etc. Análisis de impacto ambiental Manejo de desastres y mitigación Ubicación de sitios de instalaciones de residuos Estudio e inventario de RR mineros Manejo de RR marinos
Red de calles	Navegación vehicular (rutas y programación) Ubicación de casas y calles Elección de sitios Servicios de ambulancia Planificación de transportes
Sistema de información de tierras	Administración de catastro Fijación de impuestos Zonas de uso del suelo Adquisición de tierras

2.6 Beneficios de tener un SIG

- Los datos “geo-espaciales” están mejor mantenidos y en formato estándar.
- La revisión y actualización son más fáciles de realizar.
- La información de datos “geo-espaciales” es más sencilla de buscar y analizar, representando los productos con mayor valor agregado.
- Los datos “geo-espaciales” pueden ser compartidos e intercambiados libremente.
- La productividad de personal mejora y es más eficiente.
- Se ahorra tiempo y dinero.
- Pueden tomarse mejores decisiones.

La tabla 2.2 muestra las ventajas de un SIG y las desventajas de los trabajos manuales convencionales sin SIG.

[4] Fuente: Murai, S. “SIG, Manual base – conceptos fundamentales”

Tabla 2.2 SIG Vs Procedimientos manuales [4]

ACTIVIDAD	SIG	PROCEDIMIENTOS MANUALES
Mapas	Estandarizado e integrado	Diferentes escalas en diferentes formatos
Almacenamiento	Base de datos digital	Mapas en papel, censos, tablas, etc
Recuperación	Búsqueda por computadora	Control manual
Actualización	Ejecución sistemática	Es caro y consume tiempo
Superposición	Muy rápido	Consume tiempo y energía
Análisis Espacial	Sencillo	Complicado
Visualización	Barato y rápido	Costoso y lento
Conservación	En forma digital	Física y con riesgos de deterioro

2.7 Claves para un SIG exitoso

Las siguientes seis claves son los factores más importantes para un SIG exitoso

- Ingreso de datos: Como el costo del ingreso de datos representa alrededor del 80% del costo total en un SIG, la primera clave debe ser el ingreso de datos. Debe prestarse la mayor atención a la selección y clasificación de los datos "geo-espaciales" requeridos para el proyecto, tomando en consideración el método de digitalización.

- Mantenimiento de la base de datos: La segunda clave es el mantenimiento de la base de datos, particularmente el mantenimiento de la calidad de los datos y la actualización rutinaria del sistema.

- Consenso de los participantes: Se debe buscar un acuerdo entre los directivos, personal administrativo e ingenieros para el apoyo de un SIG.

- Software a medida: Como los software SIG existentes, adquiridos de manera directa o indirecta de sus fabricantes, no son suficientes para las múltiples aplicaciones que se le puede dar a esta herramienta, los usuarios deben desarrollar software o soluciones a medida para el problema, construyendo un modelo y programando un paquete de aplicaciones acordes al problema presentado.

- Datos compartidos: El uso de datos compartidos es una de las claves importantes para minimizar el costo total del ingreso de datos y también para maximizar el uso de la base de datos. Los problemas políticos y administrativos deben ser solucionados para promover el uso de datos compartidos para un SIG exitoso.

- Educación y entrenamiento: La educación y el entrenamiento son también muy importantes para entender el concepto, los objetivos y las técnicas de un SIG, debiéndose realizar cursos de capacitación para el personal que este relacionado con el manejo de esta herramienta.

[4] Fuente: Murai, S. "SIG, Manual base – conceptos fundamentales"

Capítulo 3

Sistematización de información

La sistematización de información nace como consecuencia de tener un mejor control, conservar y tener cierta facilidad en la manipulación y análisis de la información adquirida por el Laboratorio de Ensayo de Materiales de Construcción; además de buscar una herramienta que pueda cumplir con las demandas que una planificación urbana y prevención de riesgos demandan.

Los sistemas de información geográfica no sólo cumplen con estos requisitos, si no que además, se encuentran a la vanguardia a nivel mundial en aspectos relacionados al medioambiente, salud, ingeniería aplicada, actividades socio-económicas, de seguridad, etc.

De otro lado, las características del suelo de Piura son un factor que debe ser tomado en cuenta para evitar riesgos geológicos en las obras de infraestructura civil. Por esta razón, se buscó y se dio el primer paso para sistematizar la información perteneciente a la ciudad de Piura.

Se creyó oportuno tomar como base las localizaciones espaciales de los sondeos (calicatas y SPT) pertenecientes a los informes del laboratorio, ya que son éstos los que muestran las características del tipo de suelo sobre el cual se encuentra la ciudad de Piura.

3.1 Proyección de mapas [5]

A continuación se presenta un pequeño marco teórico correspondiente a cartografía, con la finalidad de familiarizar al usuario con términos empleados en el proceso de generación de mapas.

3.1.1 Sistema de coordenadas geográficas

El Sistema de Coordenadas Geográficas (Geographic Coordinate System) es un conjunto de valores que permiten definir inequívocamente la posición de cualquier punto sobre una superficie esférica tridimensional, para definir localizaciones en la Tierra.

Un punto es localizado por los valores de su longitud y latitud. La longitud y la latitud son ángulos comúnmente medidos en grados, tomados desde el centro de la Tierra a un punto

[5] Fuente: Software ArcGIS. “ ArcGIS Desktop Help”

sobre la superficie de la misma. La figura 3.1 muestra la Tierra como un globo con algunos valores de longitud y latitud.

Un sistema de coordenadas incluye una unidad angular de medición, un meridiano principal, y un datum.

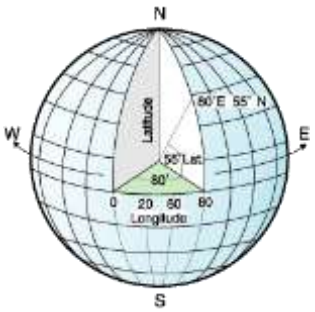


Figura 3.1 Representación de la Tierra divida en meridianos y paralelos [6]

En el sistema esférico, las "líneas horizontales" Este – Oeste son líneas con igual latitud o comúnmente conocidas como paralelos. Las "líneas verticales" Norte – Sur son líneas de igual longitud o llamadas también meridianos. Estas líneas abarcan el globo y forman una red de cuadrículas.

La línea de latitud a la mitad de los polos es llamada Ecuador, definiendo así, la línea de Latitud Cero. La línea de Longitud Cero es llamada Primer Meridiano o Meridiano Cero.

Para la mayoría de GCS, el meridiano principal es la longitud que pasa a través de Greenwich, Inglaterra. El origen de la malla (0,0) queda definida por donde el Ecuador y el Primer Meridiano se interceptan. De esta forma el globo es dividido en cuatro cuadrantes geográficos donde, el Ecuador divide al hemisferio en Norte y Sur y el Meridiano de Greenwich lo divide en Oeste y Este.

3.1.2 Esferoide y esfera

El esferoide (o elipsoide) y la esfera son superficies en tres dimensiones (Figura 3.2). Mientras que el esferoide es basado en una elipse, la esfera es basada en un círculo. De esta manera la forma y el tamaño de una superficie de un GCS viene definido por una esfera o un esferoide.

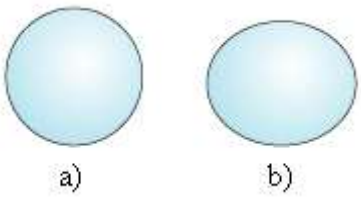


Figura 3.2 a) esfera, b) esferoide [6]

Aunque la Tierra es mejor representada por un esferoide, algunas veces es tratada como una esfera para realizar cálculos matemáticos con facilidad. Para mapas a escalas convenientes (menores a 1:5 000 000) es posible asumir que la Tierra es una esfera; a esta

[6] Fuente: IBM Spatial Support for DB2 for z/OS. "User´s Guide and References"

escala, la diferencia entre la esfera y esferoide no es detectable sobre un mapa. Sin embargo, para mantener la precisión en mapas a otras escalas (1:1 000 000 o mayores) es necesario un esferoide para poder representar la forma de la Tierra. Escoger entre esfera o esferoide dependerá de los propósitos del mapa y la exactitud con la que se soliciten los datos.

Un esferoide es definido tanto por su semieje mayor "a" como por su semieje menor "b" o por "a" y su "achatamiento". El achatamiento es la diferencia de longitudes entre ambos ejes expresados en fracción o decimales y definida como:

$$f = (a - b) / a$$

El achatamiento es un valor pequeño y usualmente cuantificado como 1/f.

La Tierra (esferoide), según el sistema "World Geodetic System of 1984", posee los siguientes parámetros:

a = 6 378 137.0 metros
b = 6 356 752.31 metros
1/f = 298.257223563

La tierra ha sido medida muchas veces para ayudarnos a entender las características de su superficie y sus peculiares irregularidades. Generalmente un esferoide es escogido para obtener un modelo de un país o un área en particular y en él poder realizar sus mediciones, sin embargo, un esferoide que mejor aproxime a una región no es necesariamente el mismo que aproxime a otra.

Hasta hace poco, Norte América utilizó el esferoide determinado por Clarke en 1866, el cual tenía como valores para el semieje mayor igual a 6 378 206.4 m y el semieje menor a 6 356 583.8 m. Cambiándolo posteriormente por uno de mayor precisión.

La tecnología satelital ha revelado varias desviaciones elípticas; por ejemplo, el Polo Sur está más cerca de la línea ecuatorial que el Polo Norte. Los satélites determinaron esferoides, reemplazando los antiguos esferoides medidos desde la tierra.

Debido a que cambiar el sistema de coordenadas de un esferoide implica un cambio en todos los valores de sus coordenadas, muchas organizaciones aún no han cambiado a los nuevos (y más precisos) esferoides.

3.1.3 Datum

El Datum define la posición del esferoide relativa al centro de la Tierra. Este proporciona un marco de referencia para la medición de ubicaciones sobre la superficie de la Tierra, definiendo de esta forma, el origen y orientación de las líneas de latitud y longitud.

Siempre que se cambie un datum, o el GCS, los valores de coordenadas de los puntos cambiarán.

Como muestra de la diferencia entre uno y otro datum, se presentan en la tabla 3.1 las coordenadas en DMS (grados, minutos, segundos) de un punto de control en Redlands,

California, en el "North American Datum of 1983" (NAD 1983 o NAD83) y otro basado en el "North American Datum of 1927" (NAD 1927 o NAD27).

El valor de la longitud difiere en unos 3 grados, mientras que el valor de latitud difiere por unos 0.005 segundos

Tabla 3.1 Diferencias entre datums NAD 1983 y NAD 1927 [5]

	NAD 1983	NAD 1927
Longitud	-117 12 57.75961	-117 12 54.61539
Latitud	34 01 43.77884	34 01 43.72995

El "North American Datum of 1983" (NAD 1983) y el "World Geodetic System of 1984" (WGS 1984) son idénticos para la mayoría de aplicaciones. En la Tabla 3.2 se presentan las coordenadas en ambos sistemas para el mismo punto de control, en Redlands.

Tabla 3.2 Diferencia entre Datum NAD 1983 y WGS 1984 [5]

	NAD 1983	WGS 1984
Longitud	-117 12 57.75961	-117 12 57.75961
Latitud	34 01 43.77884	34 01 43.778837

3.1.3.1 Datums geocéntricos

En los últimos 15 años, los satélites han provisto geodesia con nuevas mediciones para definir el mejor ajuste de la Tierra a un esferoide y cuyas coordenadas están relacionadas con el centro de masa de la tierra.

Cuando el datum utiliza el centro de masa de la tierra como origen se le conoce a la Tierra como centrada o geocéntrica. El más reciente descubrimiento y ampliamente utilizado datum, es el WGS 1984. Este sirve como marco de trabajo universal para mediciones y localización.

3.1.3.2 Datums locales

Un datum local alinea su esferoide lo más cerca posible a la superficie de la tierra a un área en particular. Un punto de la superficie del esferoide coincide con un punto (o posición) en particular sobre la superficie de la Tierra. Este punto es conocido como punto de origen del datum. Las coordenadas del punto de origen son ajustadas y el resto son calculadas a partir de éstas.

El origen del sistema de coordenadas de un datum local no está al centro de la tierra (Figura 3.3). NAD 1927 está diseñado para ajustar Norteamérica razonablemente bien, mientras ED 1950 fue creado para su uso en Europa. Debido a que un datum local alinea su esferoide lo más cercano posible a un área en particular sobre la superficie de la tierra, no es conveniente su uso fuera del área para la cual fue concebido.

[5] Fuente: Software ArcGIS. "ArcGIS Desktop Help"

3.1.4 Sistema de coordenadas proyectadas

Un sistema de coordenadas proyectadas es definido sobre el plano, en una superficie de dos dimensiones. A diferencia de los GCS, un sistema de coordenadas proyectadas tiene longitudes, ángulos y áreas constantes en dos dimensiones. Un sistema de coordenadas proyectadas es basado en un GCS y éste, como se mencionó anteriormente, está basado en una esfera o esferoide.

3.1.5 Proyección de mapas

Sea que se trate a la tierra como una esfera o esferoide, se deben transformar sus tres dimensiones para obtener un mapa. Esta transformación matemática es comúnmente referida como proyección de mapas, sin embargo, representar la superficie en dos dimensiones causa distorsión en la forma, área, distancia o dirección de los datos.

Diferentes proyecciones causan diferentes tipos de distorsión. Algunas proyecciones son diseñadas para minimizar la distorsión de los datos en uno o dos características. Un tipo de proyección puede mantener las características del área, pero como consecuencia altera su forma.

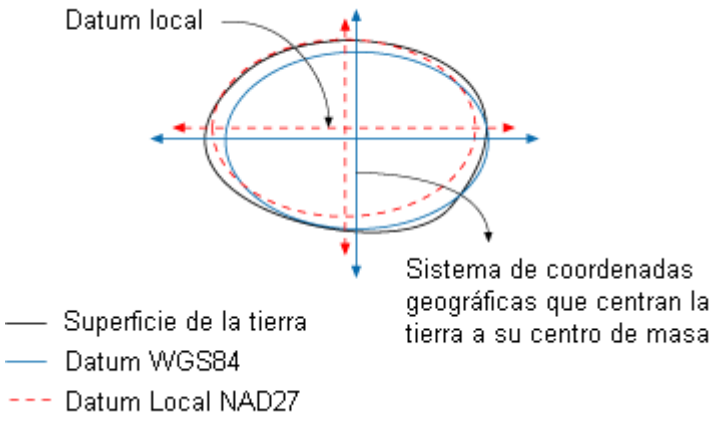


Figura 3.3 Datum local y geocéntrico [6]

La Figura 3.4 muestra como las características en tres dimensiones son comprimidas para ajustarse a una superficie plana

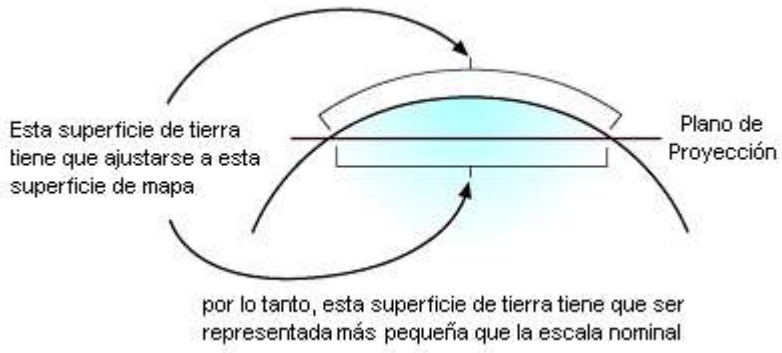


Figura 3.4 Distorsión en el proceso de proyección de mapas [7]

[6] Fuente: IBM Spatial Support for DB2 for z/OS. "User´s Guide and References"
[7] Fuente: Fundamentals of GIS data. "Georeferencing and coordinate systems"

3.1.5.1 Tipos de proyección

Debido a que los mapas son planos, alguna de las proyecciones más frecuentes son hechas con formas geométricas, que pueden ser desarrolladas sin comprometer sus superficies. Estas son llamadas superficies desarrolladas. Algunos ejemplos comunes son los conos, cilindros y planos.

Sistemáticamente, la proyección de mapas, proporciona ubicaciones desde la superficie de un esferoide para representar posiciones sobre una superficie plana, usando algoritmos matemáticos.

El primer paso para proyectar una superficie a otra es crear uno o más puntos de contacto. Sea el contacto tangente o secante, el punto o líneas de contacto son importantes porque definen ubicaciones sin distorsión. En general, la distorsión incrementa conforme nos alejamos del punto de contacto.

Comúnmente las proyecciones de mapas son clasificadas de acuerdo con la superficie usada: cónica, cilíndrica o plana. Ver Figura 3.5

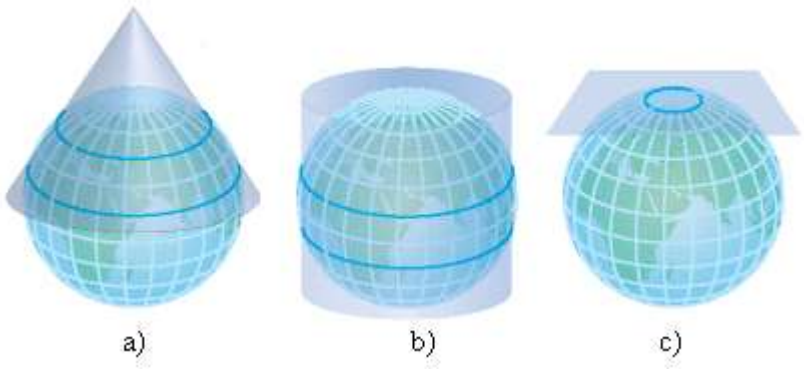


Figura 3.5 Tipos de proyección a) cónica, b) cilíndrica y c) plana [7]

- **Proyección Cilíndrica:** Así como, la proyección cónica, la proyección cilíndrica puede tener el caso de ser tangente o secante. La Proyección de Mercator es una de las proyecciones cilíndricas comúnmente utilizadas, donde el Ecuador es usualmente la línea de tangencia. Los meridianos son proyectados geométricamente sobre la superficie cilíndrica y los paralelos proyectados matemáticamente, produciendo una malla de 90 grados. El cilindro es cortado a lo largo de cualquier meridiano para producir la proyección cilíndrica final. Los meridianos son igualmente espaciados, mientras el espacio entre las líneas paralelas de latitud incrementa hacia los polos.

3.1.6 Universal Transver Mercator (UTM)

El sistema "Transverso Universal de Mercator" es una aplicación especializada de la proyección "Transverse Mercator". El cilindro es emplazado paralelamente a un meridiano en vez del Ecuador. El globo es dividido en 60 zonas tanto para el norte como para el sur. Cada palmo o tramo es de 6º de longitud. Cada zona tiene su propio meridiano central. Las Zonas 1N y 1S comienzan en –180º W (Oeste). El límite de cada zona es 84º N y 80º S. Las zonas norte y sur son divididas por el Ecuador. (Ver figura 3.6)

[7] Fuente: Fundamentals of GIS data. "Georeferencing and coordinate systems"

A diferencia del sistema de coordenadas tradicional, expresadas en longitud y latitud, las magnitudes en el sistema **UTM** se expresan en metros

Propiedades:

- "Conformal", preserva la orientación de los ángulos y la representación de pequeñas formas, pero no necesariamente su tamaño.
- Área. Existe mínima distorsión entre cada zona UTM
- Dirección. Los ángulos locales son precisos
- Distancia. La escala es constante a lo largo del meridiano central, pero con un factor de escala de 0.9996 para reducir distorsión lateral entre cada zona

Al ser ubicado el meridiano al centro de la región de interés, minimiza la distorsión de todas las propiedades de la región, pues ningún punto dentro de la región está alejado del meridiano central. El uso de esta proyección es adecuado para las zonas norte y sur.

Por esta razón, la proyección UTM se acomoda con adecuada precisión al Perú, por consiguiente, a nuestra zona de estudio.

El Perú se encuentra dentro de las Zonas 17, 18 y 19. El departamento de Piura está ubicado dentro de la Zona 17S, entre los meridianos 84º y 78º de Longitud Oeste.

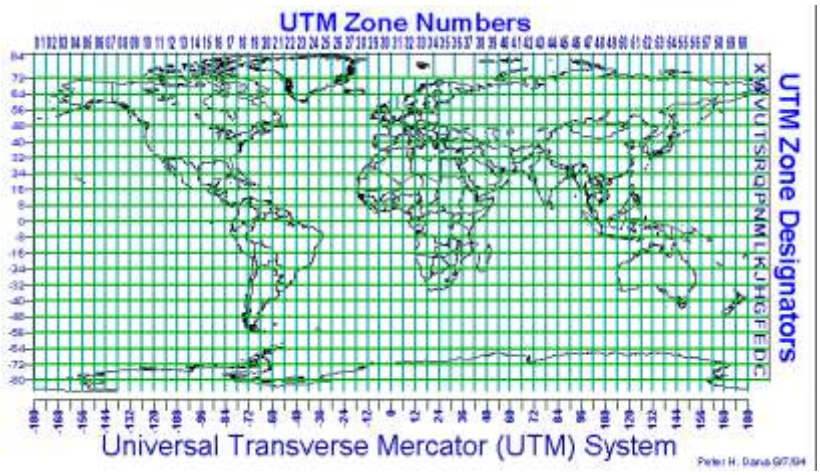


Figura 3.6 Sistema UTM [8]

3.1.7 Sistema de coordenadas escogido

En el caso concreto del Perú, el sistema de coordenadas mayormente conocido y difundido desde los años cincuenta, es el Datum Provisional de Sudamérica, por lo que se creyó conveniente localizar la información basándose en este datum y cuyos parámetros son los siguientes:

Parámetros del datum PSAD56:

a = 6 378 160.0m
1/f = 298.25

[8] Fuente: Dana, P. "Map Projection Overview"

Como se presentó anteriormente, las últimas mediciones realizadas por los satélites, presentan al Datum WGS84 como de uso universal, por lo que centra su origen al centro de masa de la Tierra. Sin embargo, la información concerniente a la ciudad de Piura y principalmente lo que conocemos como plano urbano, se encuentra en coordenadas proyectadas PSAD56, obligando a proyectar las coordenadas geográficas a este datum provisional.

El Sistema Internacional de Referencia Terrestre (del acrón. ingl."International Terrestrial Reference System", ITRS) mediante el Sistema Geocéntrico de Referencia Sudamericano (del acrón. ingl. "South American Geocentric Reference System", SIRGAS), recomienda que los países miembros de América del Sur integren su sistema nacional de referencia geodésica a uno compatible con el SIRGAS, es decir, con el "World Geodetic System of 1984" (WGS84).

Para que se tenga cierta referencia, existen cartas nacionales como las reimpresas en el Instituto Geográfico Nacional Militar, Lima-Perú 1976, cuyas proyecciones son las correspondientes a las UTM, pero que utilizan el siguiente Datum:

Datum horizontal: Provisional La Canoa 1956 (Venezuela)
Datum vertical: Nivel medio del mar (mareógrafo)

En el presente estudio, la información estructurada ha sido ordenada y localizada tanto en coordenadas geográficas como en coordenadas proyectadas UTM, tomando en cuenta el PSAD56.

Resumiendo, el sistema de coordenadas y la proyección empleados en los planos impresos y presentados en esta investigación (anexo A) corresponden a:

Sistema de Coordenadas Proyectadas: PSAD_1956_UTM_Zona_17S
Proyección: Transverse_Mercator
Datum: Provisional South American Datum 1956 (PSAD56)

3.2 Fuentes para la sistematización de información

3.2.1 Informes del LEMC de la Universidad de Piura

El Laboratorio de Ensayo de Materiales de Construcción (LEMC) forma parte de una serie de laboratorios con los que cuenta la Universidad de Piura y es parte fundamental dentro de la enseñanza de los futuros ingenieros civiles de esta casa de estudios.

Sus actividades vienen realizándose desde el año 1983 hasta el presente, efectuando trabajos dentro y fuera de la ciudad de Piura, entre los que se pueden mencionar los siguientes:

- Estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación
- Estudios de Mecánica de Suelos con fines de pavimentación
- Estudios geológicos y geotécnicos
- Hidrogeología, Geofísica
- Extracción y ensayos de probetas cilíndricas de concreto
- Mezclas asfálticas
- Pruebas de carga a estructuras

- Pruebas a materiales de construcción
- Análisis de fallas en estructuras
- Consultoría y otros más.

El LEMC cuenta con una relación ordenada cronológicamente y en formato digital de los estudios y exploraciones realizadas; de los cuales podemos encontrar cuatrocientos veintisiete (427) informes pertenecientes a los años comprendidos desde 1984 hasta diciembre 2006.

3.2.1.1 Selección de información

De un lado se tiene aquellos informes como los ensayos a probetas cilíndricas de concreto y pruebas de carga a estructuras que por su concepción y solicitación presentan información relevante para una sola estructura; y de otro lado se encuentran los estudios con fines de cimentación y pavimentación, que además de presentar información importante para el diseño de la fundación de la estructura, presentan datos que vistos en conjunto permitirán al profesional tener una concepción más clara para el ordenamiento y planeamiento coherente a las características físico mecánicas y de riesgo, desde el punto de vista de la Mecánica de Suelos aplicada a la Geotecnia.

Por lo tanto, la información tomada corresponde a trabajos realizados por nuestro laboratorio dentro de la ciudad de Piura desde el año 1985 al 2006, correspondiente a Estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación, pavimentación y aquellos Informes Técnicos que proporcionen datos relevantes para la presente tesis.

Entre los informes correspondientes al área de estudio, ochenta y nueve (89) son los encontrados, de los cuales setenta y uno (71) son con fines de cimentación y dieciocho (18) para pavimentación.

3.2.1.2 Características de los informes

Durante el transcurso de los años se ha podido observar una evolución positiva en la presentación e información de los informes de Mecánica de Suelos. Este cambio se debe a la aparición de normas nacionales e internacionales que permiten la regulación y estandarización de los estudios de Mecánica de Suelos dentro del ámbito nacional; y otra a la superación del personal técnico del laboratorio.

Estos informes presentan variada información para los fines de esta tesis, debido al requerimiento del cliente y características de la obra. Entre aquella información escogida se tiene la profundidad de exploración, cantidad de sondeos realizados, perfiles del suelo, ensayos de laboratorio, diseños, etc.

De forma general, los informes pueden ser comprendidos dentro de los siguientes puntos:

i. Memoria descriptiva.- Donde se presenta de manera ordenada el trabajo realizado y que se puede agrupar de la siguiente manera:

- Información previa.- Ubicación del área de estudio. Descripción detallada de la información recibida de quien solicita el EMS y de la recolectada por el profesional responsable.

- Exploración de campo y ensayos de laboratorio.- Descripción de los ensayos efectuados. Nivel de la napa freática. Ubicación de la napa freática indicando la fecha de medición y comentarios sobre la variación en el tiempo.
- Perfil del suelo.- Descripción de las diferentes estructuras que constituyen el terreno investigado.
- Análisis de la cimentación.- Descripción de las características físico-mecánicas de los suelos que controlan el diseño de la cimentación. Análisis y diseño de solución para cimentación.
- Efecto de sismo.
- Resumen y conclusiones de las condiciones de cimentación.- Descripción resumida de todos y cada uno de los tópicos principales del informe.

ii. Planos y perfiles del suelo

- Plano de ubicación del programa de exploración.- Plano topográfico o planimétrico del terreno.
- Perfil estratigráfico por punto investigado.- Donde se incluye la información del perfil del suelo, así como, las muestras obtenidas y los resultados de los ensayos "in situ"

iii. Resultados de los ensayos de laboratorio.- Esta parte del informe es generalmente colocada dentro de un anexo, donde se incluyen los gráficos y resultados obtenidos en el laboratorio.

Cada uno de estos apartados y de manera particular, facilitó la obtención de los datos necesarios que hicieron posible esta tesis. A continuación se presentan aquellos datos extraídos y que han sido indispensables para su ubicación y localización:

- Ubicación de las exploraciones- Cada informe cuenta en su mayoría con una distribución gráfica de sondeos y/o calicatas dentro del área a ser estudiada; representadas mediante un plano de ubicación general o simplemente parte de él.

- Litología del depósito de suelo.- En su totalidad, sea de manera gráfica, escrita o combinada, los informes cuentan con la litología del suelo, basado en la clasificación SUCS o ASSHTO; acompañados de una breve, pero importante descripción, de las condiciones en las cuales se encuentra cada perfil. Es oportuno mencionar que en aquellos informes con fines de pavimentación, se acompaña a la clasificación ASSHTO una clasificación SUCS.

- Codificación interna del LEMC de los informes y nombre de estudio.- Estos con el fin de brindar facilidad al momento de buscar referencias.

3.2.2 Tesis "Identificación de zonas con potencial de licuación en la ciudad de Piura con ensayos SPT"

La tesis del Ing. César Francisco Pinto Zegarra realizada en 1999, presenta un análisis y zonificación de áreas con potencial de licuación dentro de las ciudades de Piura y Castilla, tomando como base aquellos informes realizados por el Laboratorio de Ensayo de Materiales de Construcción desde el año 1984 hasta 1999 junto a otras fuentes que creyó conveniente.

3.2.2.1 Selección de información

La tesis del Ingeniero Pinto es una investigación relacionada a licuación de suelos, por lo que, se creyó conveniente actualizar aquellos datos que ayuden en el entendimiento y visualización de las características del suelo sobre el cual se encuentra la ciudad de Piura.

Junto a esta recopilación, se implementó y actualizó dicha información con los informes comprendidos entre los años 1999 al 2006.

A continuación se presenta la información tomada, conservando la numeración y descripción original con las que fueron presentadas en la tesis de 1999

- "Tabla N2 Profundidades de la Napa Freática" reportados en el Estudio de drenaje de la ciudad de Piura, realizados por el Centro de Drenaje y Recuperación de Tierras.

  Aunque, es conveniente determinar el mes más representativo para analizar la ubicación y profundidad de los niveles freáticos en determinada fecha y, debido a a que la tabla no muestra mucha variación en la profundidad por punto reportado a lo largo del registro, se consideró en la presente tesis tomar aquellas menores profundidades para poder aplicar los métodos de interpolación y cubrir de esta manera, la ausencia de registros de varios puntos sin información.

  La tabla se presenta en la figura 3.7

- "Tabla Nº 5.3 Resultados Obtenidos" donde se resume los resultados para cada sondeo, obtenidos por el programa de computo "Licua"; sin embargo, solamente se tomaron aquellos datos pertenecientes al distrito de Piura, por ser esta el área de estudio. La información tomada se presenta en el anexo C en la tabla C-1 y fue transcrita y pasada a formato digital para una mejor presentación de la información.

  Donde:
  "Sí" representa la susceptibilidad de licuar
  "No" representa la no es susceptibilidad de licuar

3.3 Sistematización de información

3.3.1 Ubicación y localización de informes del LEMC

El procedimiento seguido corresponde a una serie de pasos que han sido necesarios para proseguir con la siguiente etapa de creación de la estructura de datos del LEMC. La metodología presentada a continuación corresponde a un procedimiento mecánico realizado para un informe, por lo que servirá de manera sistemática y clara para la ubicación y localización de los informes siguientes. Se hace notar que la cantidad de información, claridad y detalle presentado en los planos de cada informe fueron fundamentales para dar inicio a la localización de los sondeos.

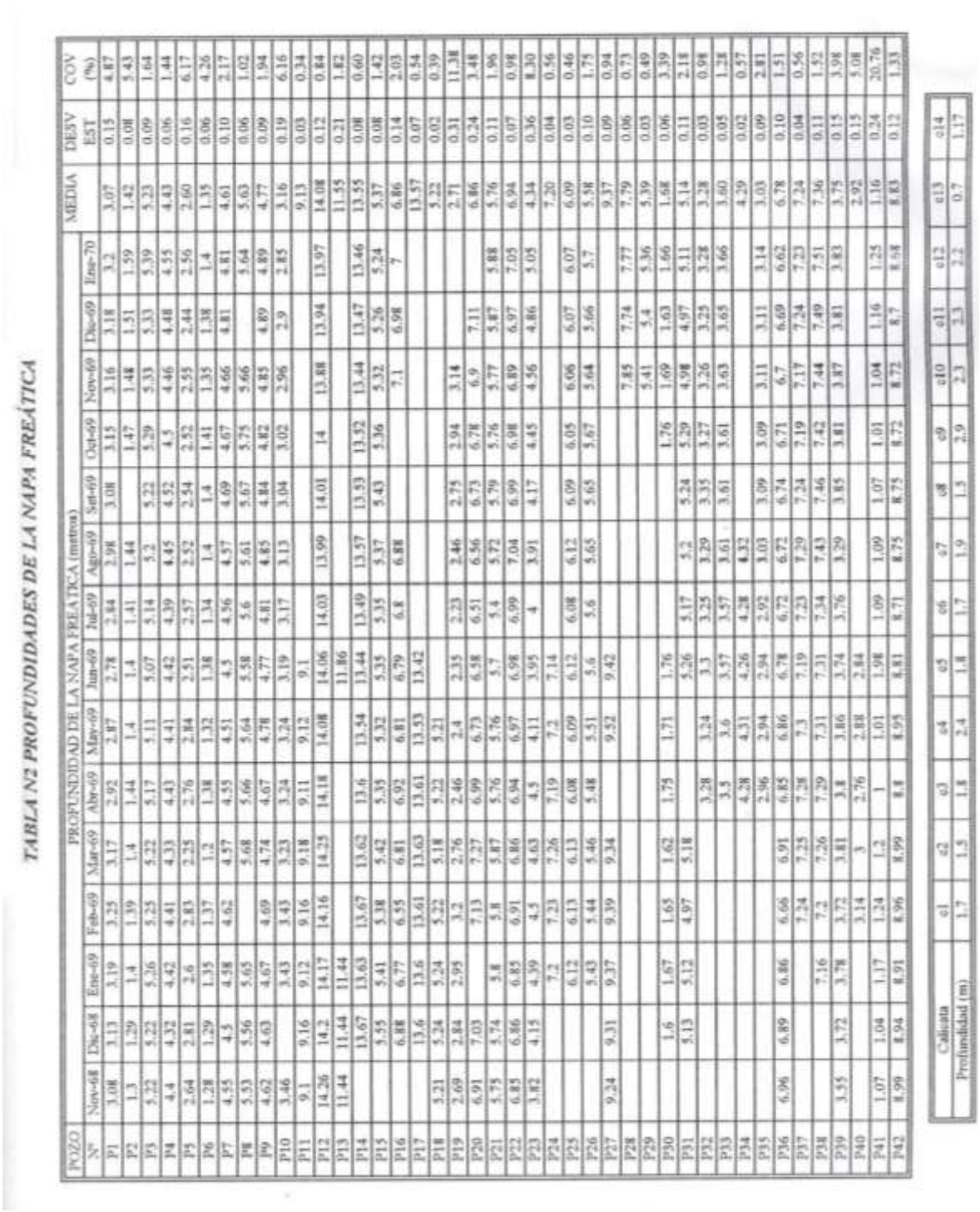


TABLA N2 PROFUNDIDADES DE LA NAPA FREÁTICA

POZO	PROFUNDIDAD DE LA NAPA FREATICA (metros)															MEDIA	DESV EST	COV (%)
Nº	Nov-68	Dic-68	Ene-69	Feb-69	Mar-69	Abr-69	May-69	Jun-69	Jul-69	Ago-69	Set-69	Oct-69	Nov-69	Dic-69	Ene-70			
P1	3.08	3.13	3.19	3.25	3.17	2.92	2.97	2.78	2.84	2.98	3.08	3.15	3.16	3.18	3.2	3.07	0.15	4.87
P2	1.3	1.29	1.4	1.39	1.4	1.44	1.4	1.4	1.41	1.44		1.47	1.48	1.51	1.59	1.42	0.08	5.43
P3	5.22	5.22	5.26	5.25	5.22	5.17	5.11	5.07	5.14	5.2	5.22	5.29	5.33	5.33	5.39	5.23	0.09	1.64
P4	4.4	4.32	4.42	4.41	4.33	4.43	4.41	4.42	4.39	4.45	4.52	4.5	4.46	4.48	4.55	4.43	0.06	1.44
P5	2.64	2.81	2.6	2.83	2.25	2.76	2.84	2.51	2.57	2.52	2.54	2.52	2.55	2.44	2.56	2.60	0.16	6.17
P6	1.28	1.29	1.35	1.37	1.2	1.38	1.32	1.38	1.34	1.4	1.4	1.41	1.35	1.38	1.4	1.35	0.06	4.26
P7	4.55	4.5	4.58	4.62	4.57	4.55	4.51	4.5	4.56	4.57	4.69	4.67	4.66	4.81	4.81	4.61	0.10	2.17
P8	5.53	5.56	5.65		5.68	5.66	5.64	5.58	5.6	5.61	5.67	5.75	5.66		5.64	5.63	0.06	1.02
P9	4.62	4.63	4.67	4.69	4.74	4.67	4.78	4.77	4.81	4.85	4.84	4.82	4.85	4.89	4.89	4.77	0.09	1.94
P10	3.46		3.43	3.43	3.23	3.24	3.24	3.19	3.17	3.13	3.04	3.02	2.96	2.9	2.85	3.16	0.19	6.16
P11	9.1	9.16	9.12	9.16	9.18	9.11	9.12	9.1								9.13	0.03	0.34
P12	14.26	14.2	14.17	14.16	14.25	14.18	14.08	14.06	14.03	13.99	14.01	14	13.88	13.94	13.97	14.08	0.12	0.84
P13	11.44	11.44	11.44					11.86								11.55	0.21	1.82
P14		13.67	13.63	13.67	13.62	13.6	13.54	13.44	13.49	13.57	13.53	13.52	13.44	13.47	13.46	13.55	0.08	0.60
P15		5.35	5.41	5.38	5.42	5.35	5.32	5.35	5.35	5.37	5.43	5.36	5.32	5.26	5.24	5.37	0.08	1.42
P16		6.88	6.77	6.55	6.81	6.92	6.81	6.79	6.8	6.88			7.1	6.98	7	6.86	0.14	2.03
P17		13.6	13.6	13.61	13.63	13.61	13.53	13.42								13.57	0.07	0.54
P18	5.21	5.24	5.24	5.22	5.18	5.22	5.21									5.22	0.02	0.39
P19	2.69	2.84	2.95	3.2	2.76	2.46	2.4	2.35	2.23	2.46	2.75	2.94	3.14			2.71	0.31	11.38
P20	6.91	7.03		7.13	7.27	6.99	6.73	6.58	6.51	6.56	6.73	6.78	6.9	7.11		6.86	0.24	3.48
P21	5.75	5.74	5.8	5.8	5.87	5.76	5.76	5.7	5.4	5.72	5.79	5.76	5.77	5.87	5.88	5.76	0.11	1.96
P22	6.85	6.86	6.85	6.91	6.86	6.94	6.97	6.98	6.99	7.04	6.99	6.98	6.89	6.97	7.05	6.94	0.07	0.98
P23	3.82	4.15	4.39	4.5	4.63	4.5	4.11	3.95	4	3.91	4.17	4.45	4.56	4.86	5.05	4.34	0.36	8.30
P24			7.2	7.23	7.26	7.19	7.2	7.14								7.20	0.04	0.56
P25			6.12	6.13	6.13	6.08	6.09	6.12	6.08	6.12	6.09	6.05	6.06	6.07	6.07	6.09	0.03	0.46
P26			5.43	5.44	5.46	5.48	5.51	5.6	5.6	5.65	5.65	5.67	5.64	5.66	5.7	5.58	0.10	1.75
P27	9.24	9.31	9.37	9.39	9.34		9.52	9.42								9.37	0.09	0.94
P28													7.85	7.74	7.77	7.79	0.06	0.73
P29													5.41	5.4	5.36	5.39	0.03	0.49
P30		1.6	1.67	1.65	1.62	1.75	1.71	1.76				1.76	1.69	1.63	1.66	1.68	0.06	3.39
P31		5.13	5.12	4.97	5.18			5.26	5.17	5.2	5.24	5.29	4.98	4.97	5.11	5.14	0.11	2.18
P32							3.28	3.24	3.3	3.25	3.29	3.35	3.27	3.26	3.25	3.28	0.03	0.98
P33							3.5	3.6	3.57	3.57	3.61	3.61	3.61	3.63	3.65	3.60	0.05	1.28
P34							4.28	4.31	4.26	4.28	4.32					4.29	0.02	0.57
P35							2.96	2.94	2.94	2.92	3.03	3.09	3.09	3.11	3.11	3.03	0.09	2.81
P36	6.96	6.89	6.86	6.66	6.91	6.85	6.86	6.78	6.72	6.72	6.74	6.71	6.7	6.69	6.62	6.78	0.10	1.51
P37				7.24	7.25	7.28	7.3	7.19	7.23	7.29	7.34	7.19	7.17	7.24	7.23	7.24	0.04	0.56
P38			7.16	7.2	7.26	7.29	7.31	7.31	7.34	7.43	7.46	7.42	7.44	7.49	7.51	7.36	0.11	1.52
P39	3.55	3.72	3.78	3.72	3.81	3.8	3.86	3.74	3.76	3.29	3.85	3.81	3.87	3.81	3.83	3.75	0.15	3.98
P40				3.14	3	2.76	2.88	2.84								2.92	0.13	5.08
P41	1.07	1.04	1.17	1.24	1.2	1	1.01	1.98	1.09	1.09	1.07	1.01	1.04	1.16	1.25	1.16	0.24	20.76
P42	8.99	8.94	8.91	8.96	8.99	8.8	8.95	8.81	8.71	8.75	8.75	8.72	8.72	8.7	8.68	8.83	0.12	1.33

Calicata	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9	c10	c11	c12	c13	c14
Profundidad (m)	1.7	1.5	1.8	2.4	1.8	1.7	1.9	1.5	2.9	2.3	2.3	2.2	0.7	1.17

Figura 3.7 Profundidades de napa freática [9]

3.3.1.1 Metodología

La metodología que se describe a continuación es un aporte del tesista, que nace como consecuencia de una carencia de sondeos "geo-referenciados". No obstante, el proceso actual de "geo-referenciación" es mediante el empleo de dispositivos GPS, los cuales de

[9] Fuente: Lostao, J. y Cornejo, A. "Estudio de Drenaje y Recuperación de Tierras"

manera rápida y sencilla brindan información localizada en el espacio y cuya información puede ser descargada a un ordenador para los fines convenientes.

i. **Esquemas de ubicación.-** Se recurrió a un método sencillo, de fácil manejo, y que no demande demasiado tiempo en su creación. Por ello, se creyó conveniente recurrir a esquemas sencillos, dibujados a mano, donde se pudiera colocar cualquier tipo de información y en cualquier momento. A continuación se presenta la metodología empleada para la creación de estos esquemas, así como, la información que estos contenían.

- Se observó en primera instancia la escala a la cual habían sido dibujados o ploteados los planos.
- Se seleccionó un punto de referencia dentro de este (origen (0,0) de un sistema coordenado relativo XY), que permita medir cualquier punto dentro del plano.
- A partir de ese punto de referencia se realizó, con escalímetro, todas las mediciones en "X" y "Y" de cada sondeo.
- Dichas distancias fueron escritas y conservadas en un esquema aparte (esquemas de ubicación) que relacionaba el punto de referencia con los sondeos mediante sus distancias en la dirección de "X" y "Y", anotando la nomenclatura de cada sondeo y ciertas cuadras o calles que se consideró importante para su posterior identificación.
- Este pequeño esquema tenía datos como la profundidad del nivel freático y toda aquella información concerniente a codificación y nombre del informe, permitiendo de esta manera la identificación del esquema con el informe matriz.

ii. **Google Earth [10].-** Es una herramienta que combina la potencia de búsquedas de Google (buscador de recursos en internet) con imágenes de satélites, mapas, terrenos y edificios 3D, para poner la información geográfica del mundo al alcance de los usuarios mediante un ordenador, de descarga y uso gratuito vía internet.

Google Earth fue la principal fuente y herramienta utilizada que hizo posible la localización de la información escrita dentro de los esquemas de ubicación.

En la tabla 3.3 se presentan algunas de las herramientas que brinda este programa, mostrando principalmente las utilizadas para la localización de la información.

Tabla 3.3 Herramientas empleadas para localización. Google Earth

HERRAMIENTA	DESCRIPCIÓN
"Add Placemark"	Permite la colocación de tachuelas ("pushpins") sobre puntos de interés
"Show Ruler"	Permite medir longitudes
"Tool_Options"	Permite configurar el sobrevuelo mediante la visualización en coordenadas geográficas (en DMS) o proyección UTM
"Places"	Permite organizar la información colocada dentro de la ventana principal del Google Earth

La localización para la presente tesis fue realizada con una versión más avanzada del Google Earth, el Google Earth Plus. Esta versión activa un comando que permite la descarga directa de información obtenida mediante dispositivos GPS hacia la pantalla del

[10] Fuente: Software Google Earth

Google Earth, completando de esta manera la localización de aquellos informes ausentes de planos. A continuación se presenta la metodología utilizada:

- Se ubicó visualmente el punto de referencia (descrito en los esquemas de ubicación), identificándolo con una tachuela sobre el Google Earth, mediante la herramienta "Add PlaceMark", pues permite identificar y conservar puntos de interés.
- Teniendo como referencia este primer punto identificado mediante "Add PlaceMark", se realizaron las mediciones con "Show Ruler" en la dirección descrita por los ejes coordenados relativos XY. De esta manera se pudo ubicar cada sondeo dentro del esquema de ubicación, conservándolos con "Add PlaceMark" y detallando sus propiedades dentro de este.
- Se organizó de manera consecutiva la información conforme iba apareciendo mediante la creación de carpetas. Detallando el código y nombre del informe localizado y ciertas indicaciones que se creyeron convenientes.

iii. **Tabla Excel**. Fue necesaria la creación de tablas donde se pudieran identificar de manera ordenada la información proveniente de los informes y del Google Earth. Esto permitió de manera rápida la adición, supresión o modificación de información, así como, se tendría un archivo en formato compatible al programa utilizado en esta tesis, ArcGIS.

- Se creó una tabla base que permitió relacionar la codificación de los informes con sus respectivos sondeos y además, los pudiera relacionar con su respectiva localización espacial mediante su latitud y longitud (Sistema de Coordenadas Geográficas, GCS).
- Las coordenadas geográficas fueron obtenidas del Google Earth, dentro de las ubicaciones anteriormente ubicadas y conservadas con "Add PlaceMark", "copiadas" y "pegadas" en la tabla de excel, dentro de la ubicación respectiva al sondeo y código del informe.
- Una vez obtenidas todas las ubicaciones espaciales de los sondeos se adicionó información como la cota sobre el nivel del mar en metros, profundidad del nivel freático, etc., respectivo a cada sondeo localizado en coordenadas geográficas.

El tiempo y el orden jugaron un rol importante para la ubicación y localización de los 369 sondeos realizados por el Laboratorio, correspondientes a la ciudad de Piura.

3.3.2 Ubicación y localización de la información obtenida en la tesis del Ing. César Pinto Z.

Para la actualización de la información presentada por el Ing. Pinto, se procedió de la misma manera que para la localización de los informes del LEMC, exceptuando la generación de esquemas de ubicación.

3.3.3 Consideraciones

A medida que se desarrollaba la investigación, surgieron requerimientos básicos para los que Piura no tiene información en la actualidad. Entre estas carencias se destacan el plano catastral y el plano topográfico ciudad de Piura, debidamente tomados con instrumentación satelital y localizados en un sistema de coordenadas.

Estas carencias llevaron a considerar ciertas pautas que no trunquen el avance del estudio, por lo que, se buscaron salidas adecuadas para el desarrollo de la presente tesis.

A continuación se presentan aquellos puntos en los que se realizaron ciertas consideraciones:

- **Ausencia de planos de ubicación de sondeos en los informes**

  En contados casos la ausencia de una referencia detallada de la distribución de sondeos o incluso nula, forzó a tomar uno o a lo mucho dos sondeos del total presentado (Tabla B-3, anexo C), ubicando dicho punto arbitrariamente dentro de la zona en estudio o tomando alguna estructura arbitraria conocida.

- **Ausencia de plano catastral debidamente ajustado a puntos de control geodésico**

  La existencia de un plano catastral debidamente levantado y ajustado a puntos de control de primer orden, junto a su respectivo plano topográfico son requisitos fundamentales para cualquier planeamiento y ordenamiento futuro de la ciudad.

  El no contar la ciudad de Piura con un plano de calles, avenidas, manzanas o cuadras debidamente identificadas con instrumentación satelital o estación total, llevó a que la ubicación de sondeos no se pueda realizar directamente sobre el plano que comúnmente circula en todos los proyectos, pues conduciría a un error difícil de cuantificar.

- **Ausencia de plano topográfico general debidamente ajustado a puntos de control geodésicos**

  Este punto requiere especial dedicación y cuidado.

  Los perfiles esquemáticos del suelo han sido detallados y graficados tomando como base (0.00) el nivel del terreno natural a la fecha de realizado el estudio; por lo que, las profundidades de cada depósito de suelo fueron tomadas respecto a este nivel considerado.

  Al no contar con cotas sobre el nivel del mar en ningún informe, el inconveniente es determinar la cota en la que se realizó dicha exploración.

  Ante la dificultad de saber con exactitud la cota del terreno al momento de realizar el estudio, se procedió a tomar un "plano topográfico referencial" realizado por la Municipalidad de Piura el año 2002 y habilitado al IHHS de la UDEP en el año 2005, considerando que la cota donde se ha ubicado el SPT o calicata es la cota de terreno natural cuando se llevó a cabo la exploración.

Presentada esta situación, se recurrió al programa Google Earth para obtener las coordenadas geográficas y proyectadas de cada sondeo, las que luego serían transformadas a PSAD56 con ayuda del software ArcGIS mediante una función propia de dicho programa.

3.4 Estructura de datos

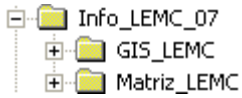
La estructura de datos es una recopilación de información ordenada y simple, organizada en carpetas y subcarpetas y que son clasificadas según la información que contienen.

De esta manera se da un primer paso que sirve como base para continuar la tarea de mantener, implementar y actualizar la data perteneciente a los trabajos de estudios de Mecánica de Suelos realizados dentro y fuera de la ciudad de Piura.

La organización y visualización de la estructura de datos de un SIG creado por ArcGIS se realizó mediante la ventana llamada ArcCatalog. ArcCatalog es una ventana donde se crean y organizan carpetas con información, las cuales son fuentes a emplear dentro del ArcMap (ventana donde se visualiza, compara la cartografía y se realizan las operaciones de análisis, modelación, etc).

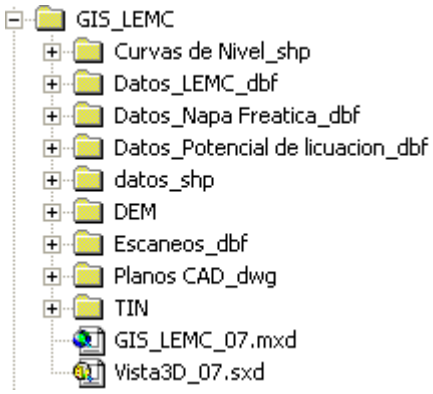
A continuación se detallan aquellas carpetas y subcarpetas junto con su contenido. Describiendo aquellas que son base para el uso del programa, mas no de aquellas extensiones o carpetas creadas automáticamente por defecto en el uso y generación del Sistema de Información Geográfica.

Info_LEMC_07.- Carpeta general que contiene la información actualizada y analizada. Esta carpeta general se divide en 2 carpetas; su descripción se presenta a continuación.



a) Matriz_LEMC.- Carpeta que contiene la información base. Esta información corresponde a los datos provenientes de Estudios de Mecánica de Suelos del LEMC, datos de la red piezométrica realizada por en Centro de Drenaje y Recuperación de Tierras en el año 1970, niveles freáticos obtenidos de los SPT y los datos actualizados de resultados del potencial de licuación realizado en el 2007.

b) GIS_LEMC.- Carpeta que contiene la información localizada, analizada y presentada. Esta carpeta contiene la fuente para los datos de entrada del software SIG utilizado y se encuentra dividida en las siguientes subcarpetas y documentos:

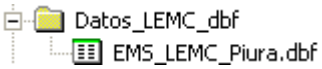


Se aclara que el último subguión "_" de cada carpeta, indica el tipo de extensión de su contenido.

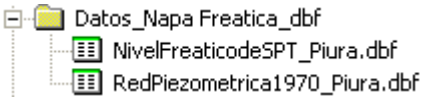
- Las carpetas “Curvas de Nivel_shp”, “datos_shp”, “DEM” y “TIN” fueron creados para almacenar información generada por defecto en el proceso y utilización del software, por lo que se sugiere no mover la información perteneciente de una carpeta a otra.

  La carpeta “datos_shp” contiene las migraciones de aquellas tablas con extensión *.dbf a *.shp, que contienen coordenadas y componente espacial (altura o elevación). Dentro de la carpeta DEM, existe una carpeta Info, creada por defecto por el uso del programa.

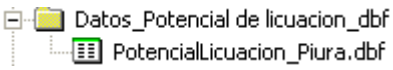
- Datos_LEMC_dbf.- Carpeta que posee un (01) archivo con datos obtenidos de los informes de suelos (SPT y calicatas) realizados por el Laboratorio.



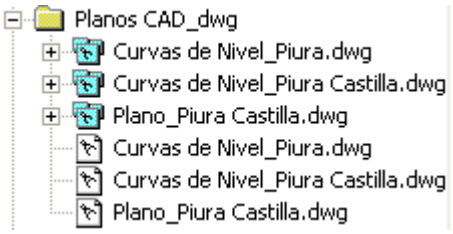
- Datos_Napa Freática_dbf.- Carpeta que posee dos (02) archivos con datos de niveles freáticos obtenidos de los SPT o calicatas y datos de los registros de la red piezométrica del año 1970.



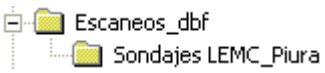
- Datos_Potencial de licuación_dbf.- Carpeta que contiene un (01) archivo con datos actualizados del análisis de potencial de licuación, realizado en el año 2007.



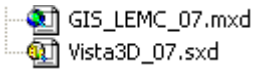
- Planos_CAD_dwg.- carpeta que posee tres (03) archivos en AutoCAD. Estos archivos son de referencia para la presente tesis, por lo que no fueron transformados a extensión *.shp.



- Escaneos_dbf.- Carpeta con una subcarpeta de nombre Sondeos LEMC_Piura, la cual contiene los escaneos de los perfiles litológicos de cada SPT o calicata.



- Por último se tienen dos (02) archivos de acceso al Sistema de Información Geográfica del Laboratorio de Ensayo de Materiales de Construcción. Al primero se accede mediante ArcMap y al segundo mediante el ArcScene.



Capítulo 4

Análisis mediante SIG

Los datos correspondientes a estudios de Mecánica de Suelos (1985 – 2006) y datos de niveles freáticos a fines de la década de los sesenta fueron ubicados y localizados dentro de un sistema de coordenadas con sus respectivas cotas sobre el nivel del mar.

Se diseñó un SIG en el cual se organizó la información de diferentes temas, almacenándolos y permitiendo trabajar con ellos de manera rápida y sencilla, facilitando la posibilidad de evaluar la información.

En el presente estudio se aplicó el SIG creado para comprender la influencia de aquellos factores de orden geológico que inducen riesgo potencial; y disminuir el tiempo en la selección de aquellos sondeos (SPT) que por sus condiciones litológicas, presencia de napa freática alta, ubicación, etc., requieren de un análisis de licuación.

De otro lado, para realizar el análisis se tuvo que recurrir a métodos de interpolación determinísticos, pues estos crean superficies de puntos medidos en base a su similitud o grado de suavidad; mientras que los métodos "geo-estadísticos" utilizan las propiedades estadísticas de los puntos medidos, pudiendo generar errores y superficies inciertas.

Uno de los métodos empleados fue la "Técnica del vecino natural" ("Natural Neighbor Technique") el cual se basa en la ponderación de cada punto a interpolar según la cercanía o vecindad al punto o puntos a ser interpolados. Este método de interpolación es recomendado para puntos con una densidad desigual, caso del presente estudio según se muestra en el plano N2 del Anexo A.

La otra forma de interpolación utilizada fue la creación de una red irregular de triángulos (TIN) y luego realizar la conversión de estos datos TIN a Raster (cuadrícula con celdas de igual tamaño).

Por otra parte y para una mejor presentación de la información analizada y a modo de referencia se presenta en el plano N1, el plano de ubicación de la ciudad de Piura, con nombres de algunas calles, avenidas, urbanizaciones, asentamientos humanos, instituciones educativas, etc., así como, el área de estudio.

El plano N2 presenta la distribución y localización de los Estudios de Mecánica de Suelos (SPT y calicatas) del Laboratorio de Ensayos de Materiales de Construcción en el periodo 1985 – 2006, según la codificación y control interno del laboratorio.

Los planos que se analizan a continuación, se han recopilado en el Anexo A

4.1 Geomorfología del área de estudio

Los datos correspondientes a cotas sobre el nivel del mar provienen de un plano digital proporcionado por el IHHS de la Universidad de Piura, el cual fue a su vez fue habilitado por la Municipalidad de Piura en el año 2005.

Una vez localizados los sondeos realizados por el laboratorio de suelos y los puntos de la red piezométrica del Centro de Drenaje y Recuperación de Tierras, se procedió a determinar la cota sobre la cual estos caían en el plano de curvas de nivel proporcionado.

El plano N3, muestra la configuración geomorfológica del suelo de la ciudad de Piura, mediante una serie de colores que identifican su relieve; donde el color azul representa aquellas zonas con cotas altas respecto al nivel del mar; y de rojo, las zonas topográficas más bajas de la ciudad.

Se presenta en este mismo plano las curvas de nivel, como producto de una función del ArcGIS que genera curvas en base a Modelos de Elevación Digital (DEM).

Según lo mostrado en este plano las zonas Norte y Noroeste de la ciudad de Piura son las áreas más altas topográficamente, donde las urbanizaciones Bello Horizonte, Los Algarrobos, Textil Piura y en general aquellas comprendidas dentro de las avenidas Los Diamantes, Prolongación Chulucanas y Av. “A”, junto al área que comprende parte de la Urb. San Eduardo, Residencial Vicús, colegio Vallesol y parte de la UDEP corresponden a las zonas con relieve topográfico más alto de la ciudad, consideradas en el presente estudio.

De otro lado, las zonas más bajas son las correspondientes a la segunda etapa de Ignacio Merino, parte de la UDEP, cierta parte de la Zona Industrial, Urbanizaciones Bancarios y El Chical, parte de la Urb. San José, áreas a ambos lados de la Av. Sullana (Pahitea, Urb. Angamos, Santa Isabel y Mercado Modelo), Urb. Grau, Urb. 4 de Enero, Urb. Los Titanes I etapa, Urb. José Carlos Mariategui y la zona sur de la ciudad (salida para la Legua).

La sección esquemática 1-1´ en el plano N3, paralela a la Av. Sullana, muestra la tendencia del relieve topográfico de la ciudad de Piura. Se puede apreciar que la diferencia entre la zona Noroeste y el Sudeste es de unos 10 metros. Se aprecia además la existencia de dos zonas topográficamente bajas, correspondientes a la Urb. Ignacio Merino y Mercado Modelo.

4.2 Profundidad del nivel freático

El plano N4 presenta cuatro tonalidades visibles que van desde el color azul al rojo, los cuales identifican las mayores y menores profundidades del nivel freático en la ciudad de Piura al año 1970.

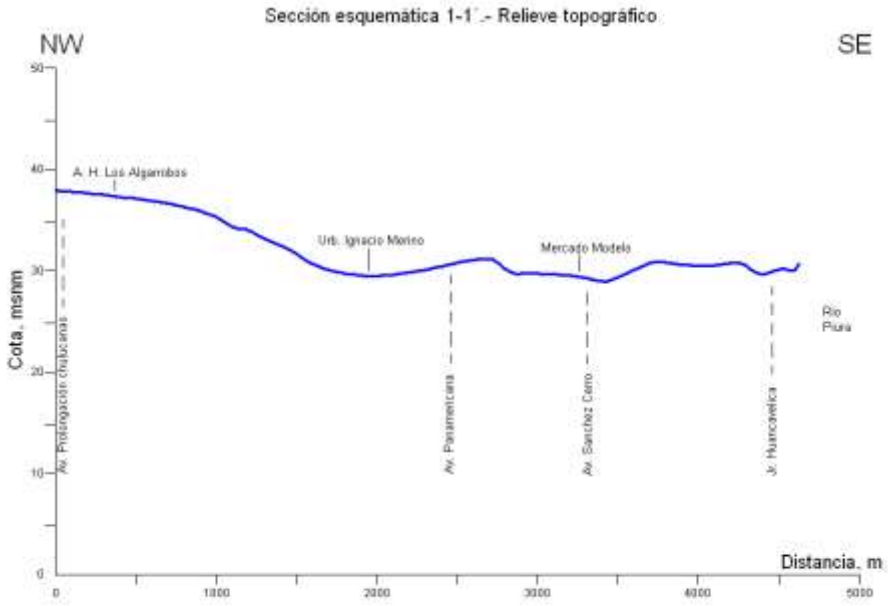


Figura 4.1 Sección esquemática 1-1´. Plano N3

Este plano N4 muestra que el nivel freático a fines de los sesenta se encontró cerca de la superficie (color rojo) en zonas donde años después se habilitarían las Urb. Ignacio Merino y Mariscal Tito; y las zonas comprendidas a ambos lados de la Av. Vice, entre las avenidas Grau y Sánchez Cerro, Zona Industrial, Mercado Modelo, Pachitea, Urb. Grau, Urb. 4 de Enero, colegio San Miguel y la zona sur de la ciudad de Piura (Barrio Tradicional Sur La Gallinacera) que al año 1970 llegaba hasta lo que hoy conocemos como Av. Circunvalación.

De otro lado, se tiene que el sector Noroeste de la ciudad tenía los niveles freáticos más profundos de la ciudad (color azul), según el registro del Centro de Drenaje y Recuperación de Tierras de 1970, los cuales correspondían a zonas donde no existían habilitaciones urbanas y que hoy corresponden a los A.H. Santa Rosa, Santa Julia, San Martín, Urb. Bello Horizonte.

Para aquellos usuarios que emplearán esta información en futuras investigaciones, se les hace notar que de comparar los niveles freáticos del año 1970 con aquellos niveles de agua encontrados en las exploraciones de campo (sondeos) del laboratorio de suelos, se deberá tener especial cuidado al intentar comparar ambos datos, pues provienen de fuentes y años distintos.

De otro lado y a manera de dato se comparó aquellos puntos piezométricos y sondeos (SPT o calicatas) coincidentes o cercanos, observando que para el punto piezométrico P17 (plano N4), la profundidad del nivel freático para el año 1970 fue aproximadamente 13 m, y luego de 25 años, en un sondeo para un estudio de Mecánica de Suelos (cod. 95-26) se le encontró a unos 8 m.

Se evitó presentar un plano con los niveles freáticos encontrados en los SPT y así evitar falsas interpretaciones de no tener en claro la información presentada en este estudio. De otro lado, se invita al usuario, investigador, público en general a realizar más

comparaciones y con ello tener una idea de cuanto puede fluctuar el nivel freático en la ciudad de Piura aplicando los SIG.

4.2.1 Relación entre la geomorfología del área y las profundidades del nivel freático

El plano N5 muestra una relación entre la geomorfología del área de estudio (colores del azul al rojo) con las curvas de profundidades del nivel freático a fines de los sesenta. Esta relación refleja que aquellos niveles altos de napa freática coinciden con aquellas zonas de niveles topográficos bajos, típica de la morfología de médanos y de acciones antropogénicas posteriores.

4.3 Dirección del flujo de agua

El plano N6 presenta cuatro tonalidades de colores visibles donde; el azul representa zonas de napa freática con cotas bajas respecto al nivel del mar; y el color rojo, a zonas de cotas de napa freática alta (1970).

Las direcciones del flujo, que se señalan perpendicularmente a las curvas de nivel de napa freática (isohipsas) en el plano N6, indican que la dirección del movimiento del agua es en forma radial; en general, de las zonas de napa freática alta hacía la margen derecha del Río Piura y hacia la zona Suroeste de la ciudad.

En el mismo plano 6 se muestra que las zonas donde el nivel de la napa freática es alta, corresponden al área limitada por los colores rojo y amarillo, y las bajas a las azules.

- **Perfiles esquemáticos**

  Se creyó conveniente generar cuatro (04) perfiles longitudinales (1-1´,2-2´,3-3´,4-4´) a partir del plano N6, para ver la tendencia de los niveles de napa freática en el área de estudio.

  El perfil esquemático 1-1´ Norte – Sur corta las zonas con niveles de napa freática más alta en la ciudad de Piura, desde las cuales el escurrimiento de agua empieza en dirección a las curvas de nivel de napa más bajas. Se puede ver que no existe mucha diferencia entre los niveles freáticos del extremo norte y sur para el año 1970, pero que presenta a las habilitadas urbanizaciones Ignacio Merino y Los Titanes como zonas en donde la napa freática es casi superficial.

  Los perfiles esquemáticos 2-2´, 3-3´ y 4-4´ de direcciones Suroeste – Noroeste muestran la tendencia radial del escurrimiento de la napa freática en dirección al río Piura y Suroeste de la ciudad. Estos perfiles muestran a las zonas donde hoy se encuentran habilitadas la Urb. Ignacio Merino, Urb. Santa Ana, A. H, Víctor Raúl y el Barrio Sur como áreas de napa freática alta para el año 1970.

Por último, para que se pueda tener una mayor comprensión, entendimiento y apreciación de la relación entre la morfología del suelo y napa freática, se superpusieron los niveles temáticos de la geomorfología del área y los niveles de napa freática, con ayuda del ArcGIS, y cuyo análisis se presenta a continuación.

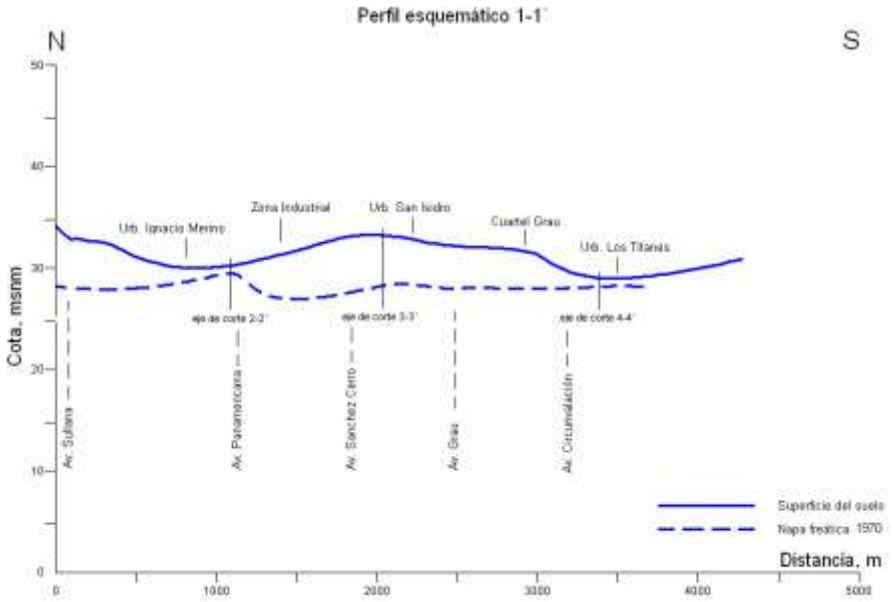


Figura 4.2 Perfil esquemático 1-1´. Plano N6

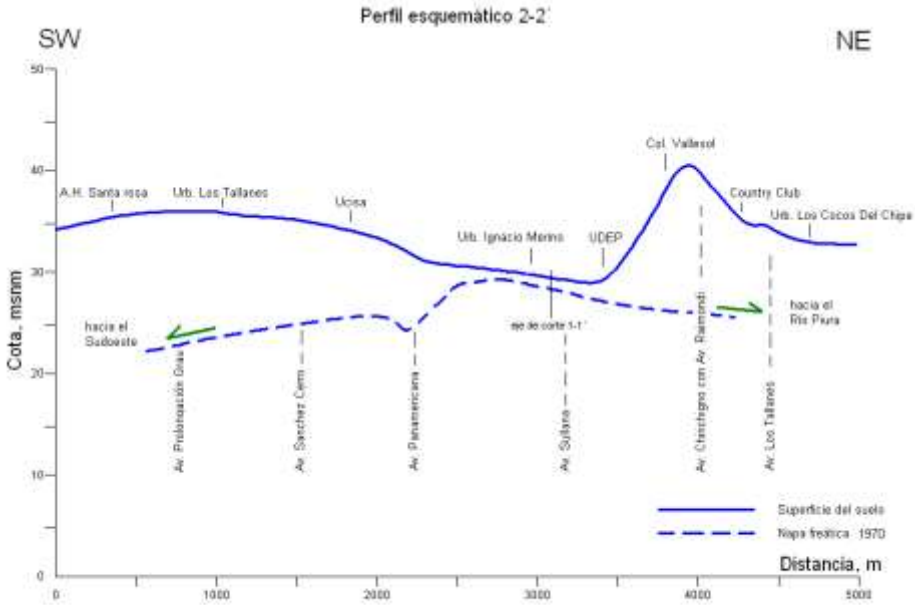


Figura 4.3 Perfil esquemático 2-2´. Plano N6

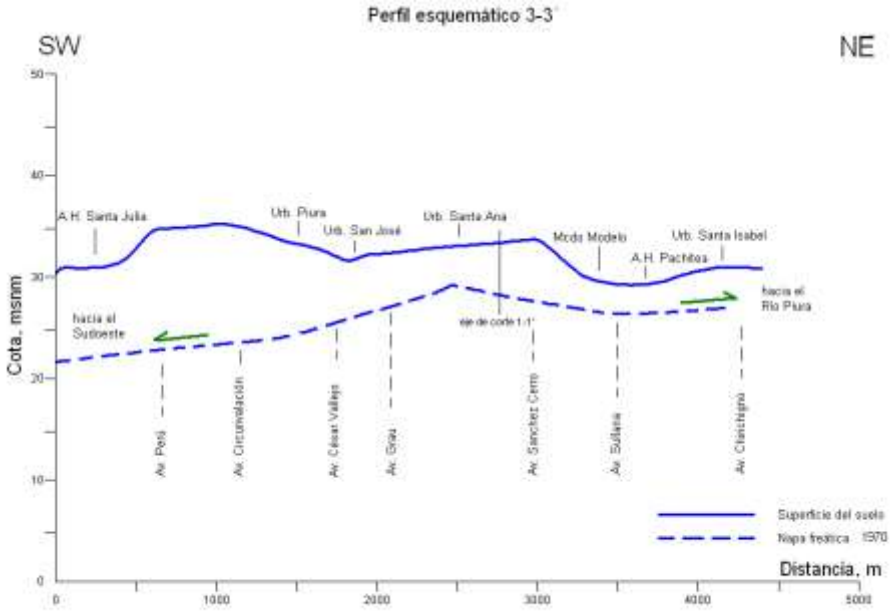


Figura 4.4 Perfil esquemático 3-3´. Plano N6

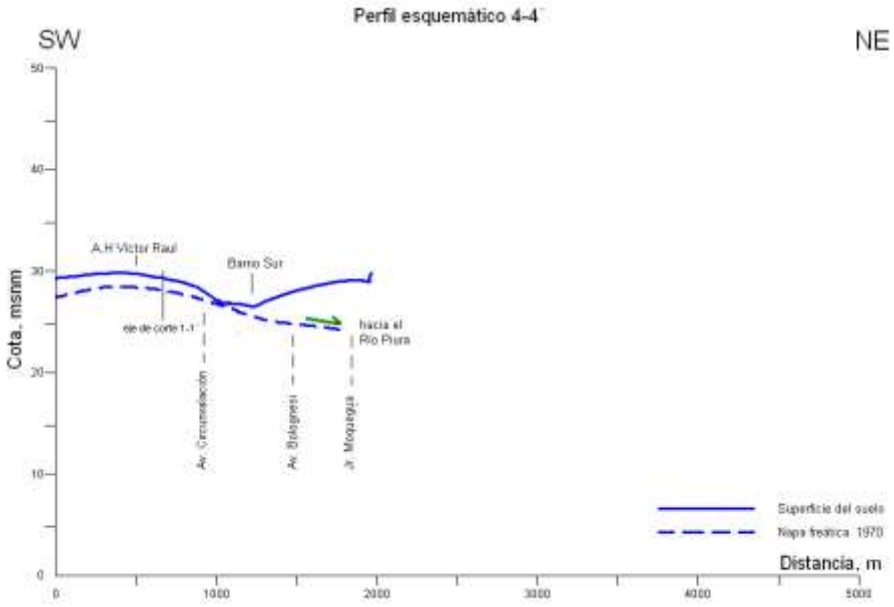


Figura 4.5 Perfil esquemático 4-4´. Plano N6

4.3.1 Relación entre la geomorfología del área y los niveles de napa freática

Es en esta relación y la de la sección 4.2.1 se muestra una de las facilidades que presentan los SIG para el análisis de información, pues permite tomar en consideración aquellos niveles temáticos necesarios, superponiendo las capas de interés en un solo plano.

La superposición de estos dos niveles es representada en el plano N7.

Se pide paciencia al lector al analizar este plano, pues la cantidad de datos podría llevar a confusión.

Se creyó conveniente esta relación, pues nos permitirá visualizar en una misma hoja dos niveles temáticos, de esta manera realizar las comparaciones entre la configuración geomorfológica por medio de sus curvas de nivel y las curvas de igual nivel de napa freática en 1970.

Se puede apreciar en este plano que existió en ciertas zonas, la convergencia de niveles topográficos y los niveles del escurrimiento de la napa freática, lo que implica que dichas áreas de convergencia de niveles (topográfia y napa freática) se hayan visto reflejadas en niveles freáticos casi superficiales.

Esta convergencia y según lo mostrado en el plano N7, presenta zonas en las que en el año 1970 no existían habilitaciones urbanas, y que hoy comprenden la Urb. León Saldivar, A. H. Víctor Raúl Haya de La Torre y la Urb. Los Titanes (las tres al sur de Piura); Ignacio Merino II etapa y parte de la UDEP (ambas al norte de la ciudad), como zonas donde la napa freática fue superficial y afloró a fines de 1960.

Se puede entender que aquellos niveles topográficos coincidentes con los niveles del flujo de la napa freática, se encontrarán constantemente aflorando a la superficie o muy cerca de ella de no existir periodos de sequía prolongados, aunque actualmente esta recarga puede deberse al aporte de agua de otras subcuencas y de la explotación acuífera de la ciudad.

Una vista en 3D, mediante el empleo de una extensión del ArcGIS, ArcScene, permite tener una visión más privilegiada para comprender en que zonas de la ciudad, a parte de las descritas en el párrafo anterior, los niveles de escurrimiento de la napa freática se encuentran cerca de la superficie.

ArcScene es una extensión que permite visualizar en 3D datos con variable en la tercera dimensión (altura o elevación). La mejor manera en que trabaja esta extensión, a criterio del tesista, es interactuando directamente con la información. De esta manera el usuario puede interactuar con las imágenes y analizarlas según su conveniencia. Por este motivo y de no encontrarse el "mejor ángulo" en 3D que pueda ser representado en una hoja de impresión, no se presenta ninguna imagen correspondiente a la tercera dimensión.

Para un mejor entendimiento de estas convergencias se realizaron cortes longitudinales (5-5´ y 6-6´) sobre el plano N7, según se describen a continuación.

- **Perfiles esquemáticos**

El perfil esquemático 5-5´ al sur de la ciudad de Piura muestra una gemorfología suavemente ondulada, con tendencia a disminuir de nivel en dirección Sudeste. Este perfil presenta a esta zona de la ciudad de Piura de haber sido susceptible a inundación, por la convergencia de los niveles topográficos con los niveles de la dirección de flujo de la napa freática.

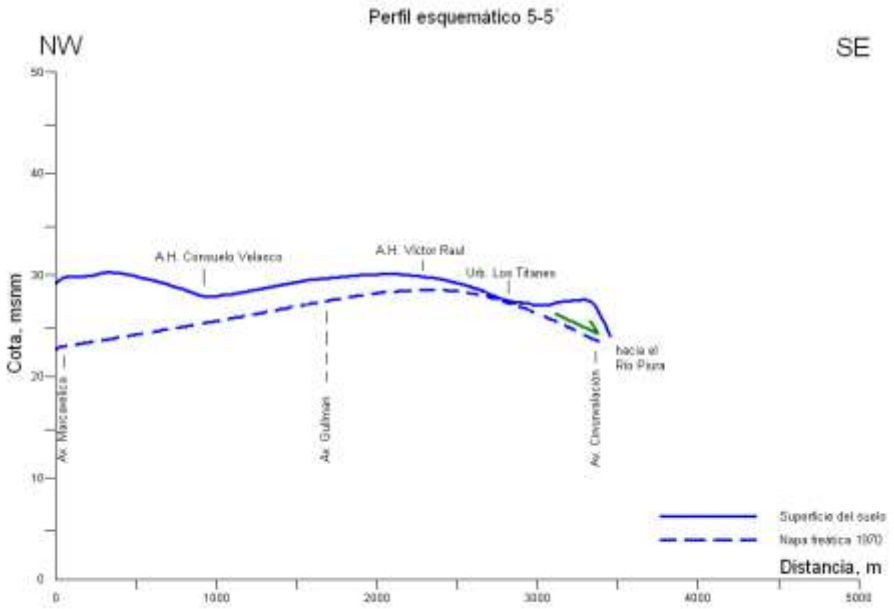


Figura 4.6 Perfil esquemático 5-5´. Plano N7

Se puede entender al 2007 que los AA. HH. Víctor Raúl y Consuelo Velasco junto a la Urb. Los Titanes son zonas susceptibles a inundación y constantemente se verán afectadas por el afloramiento de la napa freática en superficie.

El perfil 6-6´ con dirección Suroeste – Noreste, presenta tres (03) depresiones topográficas (hoy A. H. Santa Julia, Urb. Ignacio Merino y la Urb. Los Geranios), lo cual muestra que la ciudad de Piura no es tan "plana" como comúnmente se considera en varios proyectos. Este perfil deja en descubierto que para el 2007 la urbanización Ignacio Merino puede encontrarse con napas freáticas altas constantemente, por la coincidencia de sus niveles topográficos con los niveles del escurrimiento de la napa.

Se puede apreciar que en ambos perfiles esquemáticos (5-5´ y 6-6´) muestran las características de drenaje natural de forma radial, teniendo como colector final el río Piura y la zona Suroeste de la ciudad.

Ambos perfiles han sido expuestos para mostrar la configuración del suelo de la ciudad de Piura frente a los riesgos geotécnicos (inundaciones, erosión, drenaje, licuación, etc) en primera aproximación

4.4 Potencial de licuación

Tener la información dentro de un SIG facilitó identificar aquellos sondeos que por su configuración litológica, ubicación geográfica y presencia de napa freática alta son potencialmente susceptibles de sufrir licuación. De esta manera, se ahorró tiempo en evaluar sólo aquellos sondeos que presentaron una disposición a riesgo potencial de deformación del suelo, prescindiendo de aquellos que no la presentan. Sin embargo, a manera de análisis se realizó la evaluación de aquellos sondeos "no susceptibles" a este fenómeno

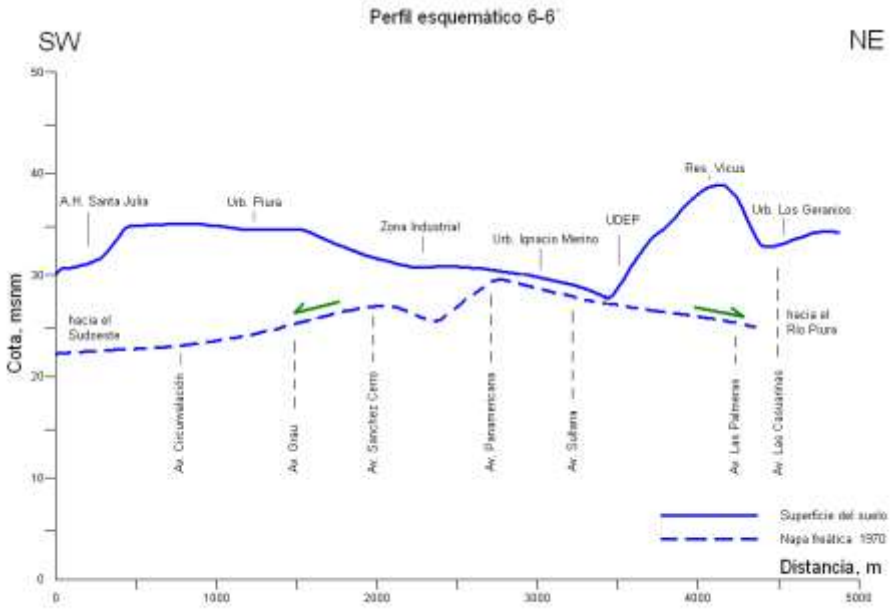


Figura 4.7 Perfil esquemático 6-6´. Plano N7

La disposición del suelo a licuar de sufrir un sismo de intensidades y aceleraciones que puedan originar la activación de este, fue tomada en cuenta según las correlaciones de las características litológicas obtenidas de los EMS (SPT y calicatas), análisis de la geomorfología, relieve topográfico y de la posición de la napa freática en la ciudad de Piura, las cuales fueron observadas con ayuda del SIG creado.

Los fenómenos relacionados a la licuación o comúnmente conocido por el nombre de licuación, es una deformación del suelo originada por un incremento de la presión de agua en los poros en un suelo sin cohesión saturado por agua, debido a una carga externa sísmica o no sísmica y que tiene como consecuencia la disminución o pérdida de la capacidad portante del suelo en resistir su propio peso o el de alguna estructura que este sobre él, y de darse el caso podría originar daños a dicha estructura.

Los antecedentes históricos de ocurrencia del FEN como el de 1983 y 1998, que sometieron a esta ciudad a un grado de saturación del suelo eólico sin cohesión, lleva a pensar que de coincidir con un evento sísmico como el descrito anteriormente constituye un riesgo que es necesario prevenir.

Capítulo 5

Identificación mediante SIG de sondeos con potencial de licuación

El empleo de los SIG para la presente tesis es utilizar esta herramienta para visualizar la distribución geográfica de los estudios de mecánica de suelos, correlacionar los niveles freáticos, cotas topográficas y perfiles de los depósitos de suelo; y en base a ello identificar sondeos referenciados con potencial de sufrir licuación.

La licuación es uno de los temas más importantes, interesantes, complejos y controversiales en la Ingeniería Geotécnica Sísmica. Tanto el terremoto Good Friday (Mw=9.2) en Alaska, como el terremoto de Niiagata (Ms=7.5) en Japón despertaron el interés de los Ingenieros Geotécnicos en el año de 1964 debido a los daños inducidos por los fenómenos relacionados a la licuación.

Estos fenómenos son el resultado de una disminución de la capacidad portante del suelo sin cohesión y saturado por agua, debido a la generación de un exceso de presión de poros originado por un agente externo sísmico o no sísmico. De esta manera y de existir una estructura sobre este suelo potencialmente licuable, podría originar daños a la misma.

La presente tesis recopila información presentada por Steven L. Kramer, el cual introduce algunas nuevas terminologías para distinguir entre fenómenos que han sido unidos frecuentemente bajo el encabezado de licuación. Estas nuevas terminologías permiten que este fenómeno sea ilustrado de modo que simplifique el entendimiento del mecanismo y la manera en como estos contribuyen a los daños producidos por los sismos.

En este capítulo se presenta en primer lugar un marco teórico correspondiente a los fenómenos relacionados a la licuación, condiciones para que este fenómeno ocurra, enfoques para el análisis del riesgo potencial de licuación y procedimientos para su evaluación. Por último, con ayuda del SIG y lo descrito en el primer párrafo determinar que sondeos dentro del periodo 1985-2006 son susceptibles de sufrir este fenómeno.

5.1 Fenómenos relacionados a la licuación [11]

El término licuación ha sido utilizado para describir una serie de deformaciones causadas por una alteración uniforme, transitoria o repetida de un suelo saturado (con agua) sin cohesión bajo condiciones no drenadas (posibilidad de drenaje nula o lenta). La generación de un exceso de presión de poros bajo una carga en condiciones no drenadas es un sello propio de todos los fenómenos de licuación. El fenómeno de licuación que resulta de este proceso puede ser dividido en dos grandes grupos: "flujo por licuación" y "movilidad cíclica".

En el campo, el flujo por licuación ocurre con menos frecuencia que el de movilidad cíclica, sin embargo, sus efectos son más severos comparados con los efectos ocasionados por movilidad cíclica, los cuales pueden variar de insignificantes a graves.

En el presente estudio, el término licuación será tomado para incluir tanto al flujo por licuación como el de movilidad cíclica, así como, cuando se hace mención a "un suelo saturado" se aclara que los espacios vacíos de un suelo son cubiertos por agua, y que *sin la presencia de este elemento (agua), el fenómeno de licuación no podría ocurrir*.

5.1.1 Flujo por licuación

El flujo por licuación puede ocurrir cuando el esfuerzo de corte requerido para el equilibrio estático de la masa de suelo (esfuerzo de corte estático) es mayor que el esfuerzo resistente del suelo en estado licuado. Una vez iniciadas las grandes deformaciones producidas por la licuación, el esfuerzo de corte estático es el que lleva a cabo dichas deformaciones.

El flujo por licuación produce los efectos más dramáticos de todos los fenómenos relacionados a la licuación. Uno de estos son las llamadas fallas por flujo (Figura 5.1). Otro tipo conocido son las fallas por deslizamiento.

Figura 5.1 Falla por flujo. Lago Merced, terremoto de "Daly City", 1957 [12]

Las fallas de flujo por licuación son caracterizadas por la naturaleza repentina de su origen, la velocidad con la que se desarrolla, y las grandes distancias sobre el cual el material licuado suele ser movido.

[11] Fuente: Kramer, S. "Geotechnical Earthquake Engineering"
[12] Fuente: United States Geological Survey. "About liquefaction"

5.1.2 Movilidad cíclica

La movilidad cíclica ocurre cuando el esfuerzo de corte estático es menor que el esfuerzo resistente del suelo licuado. A diferencia del flujo por licuación, las deformaciones producidas por movilidad cíclica son llevadas a cabo tanto por el esfuerzo de corte estático como el cíclico. Estas deformaciones producidas se incrementan durante el sismo y son conocidas como expansiones laterales, pudiendo ocurrir de manera suave e inclinada o incluso plana en suelos adyacentes a cuerpos de agua (Figura 5.2 a).

Un caso especial de movilidad cíclica es la "licuación del nivel del suelo" ("level-ground liquefaction"). Este tipo de falla es causado por un flujo ascendente de agua cuando el exceso de presión de poros inducidos por el sismo se atenúa. Las características de este fenómeno son un excesivo asentamiento o colapso del suelo y la consecuente inundación de la parte baja, así como, la formación de pequeños volcanes de arena ("sand boils") (Figura 5.2 b).

5.2 Susceptibilidad a la licuación

No todos los suelos son susceptibles de licuar, consecuentemente el primer paso para la estimación de riesgos de licuación es la evaluación a la susceptibilidad frente a este fenómeno. Este tipo de evaluación incluye los siguientes puntos:

- Criterios históricos
- Criterio geológicos
- Criterios de composición.
- Criterios de estado

Figura 5.2 Movilidad cíclica a) expansión lateral. Río Motagua – terremoto de Guatemala, 1976; b) volcanes de arena. Terremoto de Loma Prieta, 1989 [13]

5.2.1 Criterios históricos

Los casos históricos de licuación pueden ser usados para identificar zonas específicas o las condiciones del lugar que pueden ser susceptibles a licuación en futuros sismos.

Investigaciones de campo post sísmicas han mostrado que los efectos de licuación han sido confinados dentro de una zona, a una distancia particular a la fuente sísmica (Figura 5.3).

[13] Fuente: Johansson, J. "Soil liquefaction website"

La distancia a la cual la licuación puede ser esperada incrementa dramáticamente con el incremento de la magnitud del sismo.

Esta figura es útil para estimar escenarios de riesgo frente a la licuación y no debe tomarse como que la licuación no ocurrirá a grandes distancias.

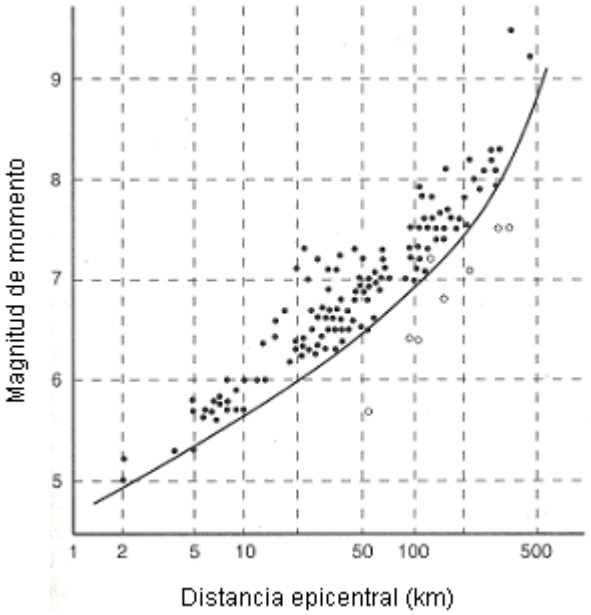


Figura 5.3 Relación entre la distancia epicentral en zonas donde se ha observado licuación y la magnitud de momento superficial [11]

5.2.2 Criterios geológicos

El tipo de proceso geológico que creó el depósito de suelo tiene una influencia enorme en la susceptibilidad a la licuación. El reconocimiento en campo debe orientarse a ubicar depósitos de suelos saturados o con posibilidad de saturación, que han sido creados por la sedimentación de ríos y lagos (depósitos fluviales o aluviales), la deposición de material erosionado (depósitos coluviales) o depósitos formados por la acción del viento (depósitos eólicos). Ver tabla 5.1. Estos procesos distribuyen las partículas en tamaño de grano uniforme y las depositan en estado suelto y que tienden a densificarse cuando son sacudidas por sismos o por algún otro proceso.

5.2.3 Criterios de composición

Debido que la licuación requiere un incremento de presión de poros, las características de los elementos que componen el suelo influyen en el comportamiento del cambio de volumen, tales como el tamaño, forma y gradación.

Por muchos años se creyó que el fenómeno relacionado a la licuación era limitado sólo a las arcillas. Suelos de granos finos fueron considerados incapaces de generar alta presión de poros. Por otro lado suelos de granos gruesos fueron considerados muy permeables para poder mantener lo suficiente cualquier generación de presión de poros y que puedan desarrollar licuación. Recientemente los límites de gradación de suelos para la licuación han sido ampliados.

[11] Fuente: Kramer, S. “Geotechnical Earthquake Engineering”

Se ha observado licuación en limos no plásticos en laboratorio y campo. Limos gruesos con partículas abultadas o en grumos no plásticos y sin cohesión son también susceptibles de licuar. De otro lado, las arcillas permanecen no susceptibles a licuar, sin embargo, algunas arcillas sensibles pueden exhibir un comportamiento parecido que al de un suelo licuado, pero que es denominado tixotropía.

Tabla 5.1 Susceptibilidad a licuación según el tipo de depósito del suelo

CLASIFICACIÓN		DEPÓSITO DE SUELO
A	Área con alta probabilidad de licuación (se necesita realizar investigaciones detalladas)	Lecho de río antiguo Lecho de río Terrenos bajos entre dunas de arena con nivel freático alto Terreno inundable Terraplén de terreno inundable Rellenos ganados
B	Área con probabilidad de licuación (se necesita realizar investigaciones simples)	Areas que no corresponden a las clases A y C
C	Área con baja probabilidad de licuación (no se necesita realizar investigaciones)	Montañas Colinas Plataformas

Aquellos suelos de grano fino que satisfagan los siguientes cuatro criterios de la tabla 5.2 pueden ser considerados susceptibles a una pérdida significativa de esfuerzos:

Tabla 5.2 Valores límite para suelos de grano fino que pueden ser considerados susceptibles a pérdida significativa de esfuerzos

CONDICIÓN	LÍMITE
Fracción fina > 0.005mm	<= 15%
Límite líquido (LL)	<=35%
Contenido natural de agua	>=0.9LL
Índice de plasticidad (IP)	<=0.75

Cuando la disipación de la presión de poros es impedida por capas impermeables, de manera que exista la condición no drenada, las gravas también pueden ser susceptibles de licuar. Este fenómeno ha sido observado tanto en campo como en laboratorio

La susceptibilidad a la licuación es influenciada por la gradación del material. Suelos bien gradados son generalmente menos susceptibles que aquellos suelos pobremente gradados. El llenado de vacíos entre partículas grandes con partículas más pequeñas en un suelo bien gradado resulta en un bajo potencial de cambio de volumen bajo condiciones saturadas y, consecuentemente, menos exceso en la presión de poros, por tanto menos licuable. Evidencias en campo indican que las fallas de licuación han envuelto a suelos uniformemente gradados.

5.2.4 Criterios de estado

De darse el caso que un suelo posea todos los criterios de sensibilidad a la licuación puede que sea o no susceptible. La susceptibilidad también depende del estado inicial del suelo (como las características de esfuerzo y densidad al momento del sismo). Este criterio de susceptibilidad, a diferencia de los descritos anteriormente, es diferente para el flujo por licuación como para movilidad cíclica.

5.2.4.1 Relación de vacíos crítica

Pruebas triaxiales realizadas a suelos sueltos presentaron inicialmente una contracción o densificación; mientras que los densos se contrajeron primero y luego empezaron a dilatarse rápidamente. El comportamiento de la resistencia del suelo mostró que todas las muestras probadas a una misma presión efectiva de confinamiento alcanzaron la misma densidad cuando se les esforzó para llegar a grandes deformaciones (Figura 5.4). La relación de vacíos correspondiente a esta densidad constante se le llamó relación de vacíos crítica (CVR). Casagrande encontró que esta relación de vacíos crítica estaba únicamente relacionada a la presión efectiva de confinamiento.

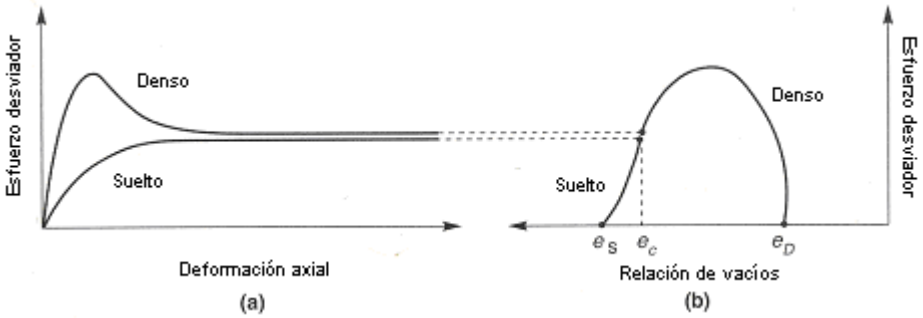


Figura 5.4 a) esfuerzo-deformación, b) esfuerzo desviador-relación de vacíos [11]

Pues bien, definiendo el estado del suelo en términos de su relación de vacíos y su presión efectiva de confinamiento, la línea CVR marcó el límite entre el comportamiento de contracción y dilatación, consecuentemente, determinó el límite entre estados en que un suelo en particular es susceptible o no a flujo por licuación (Figura 5.5).

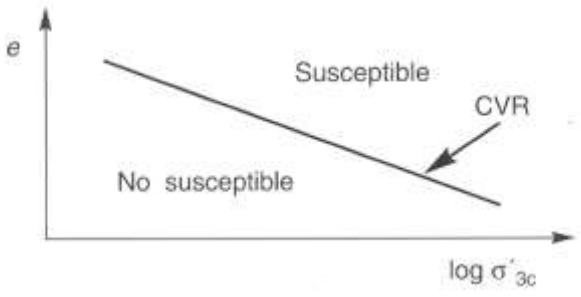


Figura 5.5 Empleo de línea CVR como límite entre estados iniciales de suelos que son susceptibles o no a licuación por flujo [11]

[11] Fuente: Kramer, S. "Geotechnical Earthquake Engineering"

5.2.4.2 Estado constante de deformación

Castro (1969) realizó pruebas cíclicas y estáticas a muestras de suelos isotrópicos consolidados y otras pruebas cíclicas a muestras anisotrópicas consolidadas, observando tres tipos de comportamiento esfuerzo-deformación.

Estas pruebas mostraron una única relación entre la presión efectiva de confinamiento y la relación de vacíos a grandes deformaciones. Los puntos que describen esta relación fue llamada "línea de estado constante" ("steady state line", SSL). Aquellos suelos que caigan por encima de esta línea serán susceptibles de licuar por flujo sólo si el esfuerzo de corte estático excede a su estado de deformación constante, S_{su} (Figura 5.6).

El estado en el cual el suelo fluyó continuamente bajo un esfuerzo de corte y una presión de confinamiento constantes a un volumen y velocidad también constantes, fue definida posteriormente como "estado constante de deformación" ("steady state of deformation").

De otro lado, la movilidad cíclica puede ocurrir en suelos que caigan por debajo y encima de esta línea; dicho de otro modo, la movilidad cíclica puede ocurrir en suelos densos y sueltos.

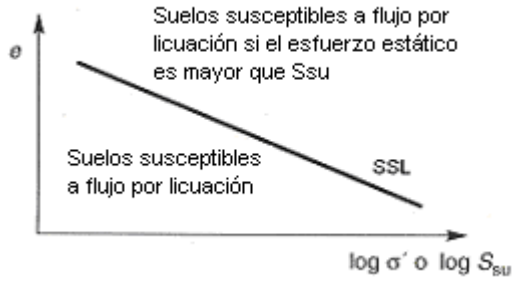


Figura 5.6 Empleo de línea SSL como límite entre suelos susceptibles a flujo por licuación [11]

5.2.4.3 Parámetro de estado

El parámetro de estado queda definido como la diferencia entre el estado inicial y la línea de estado constante (Figura 5.7). Cuando este parámetro de estado sea positivo, el suelo exhibirá un comportamiento de contracción y podría ser susceptible a flujo por licuación; si es negativo, exhibirá un comportamiento de expansión y el suelo no será susceptible a flujo por licuación.

El comportamiento de los suelos sueltos y la proximidad del estado inicial deben estar más relacionados a la línea de estado constante (SSL), que a los valores de su densidad. En otras palabras, los suelos que se ubiquen a la misma distancia de la línea de estado constante deben exhibir comportamientos similares.

5.3 Iniciación de la licuación

A pesar que la movilidad cíclica es un fenómeno relacionado a un sismo, el flujo por licuación, puede ser iniciada de otras formas no sísmicas como fuentes de vibración, equipos de perforación, tráfico de trenes, exploraciones geofísicas y fuertes explosiones.

[11] Fuente: Kramer, S. "Geotechnical Earthquake Engineering"

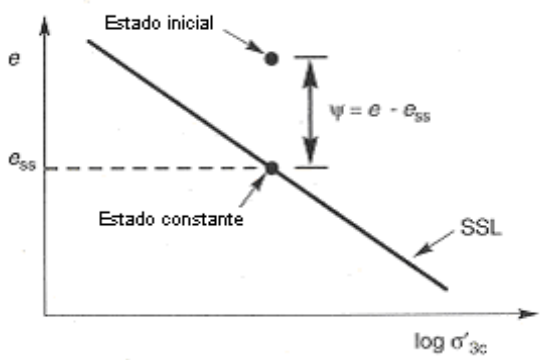


Figura 5.7 Parámetro de estado "Ψ", donde "e_{ss}" es la relación de vacíos en estado constante de deformación[11]

El hecho que un suelo sea susceptible de licuar no significa que la licuación ocurra ante un sismo; su ocurrencia requiere de una perturbación lo suficientemente grande para iniciarla. La evaluación de la naturaleza de está perturbación, es una de las partes más críticas en la evaluación de riesgos de licuación, por lo que, entender su iniciación requiere la identificación del estado del suelo cuando la licuación es activada.

5.3.1 Superficie de flujo por licuación

Las condiciones de la presión efectiva en la iniciación del flujo por licuación, puede ser descrita por el camino de esfuerzos o por una superficie que en adelante se le llamará "superficie de flujo por licuación" ("flow liquefaction surface", FLS). Esta superficie es muy útil para entender la relación entre varios fenómenos de licuación y es vital para una evaluación apropiada del comportamiento de suelos licuables durante y después del movimiento sísmico.

5.3.1.1 Carga uniforme

Las condiciones de inicio del flujo por licuación pueden ser mejor entendidas cuando el suelo es sujeto a un incremento uniforme de esfuerzos. Consideremos, por ejemplo, la respuesta de una muestra de suelo isotrópico consolidado suelto de arena saturada no drenada a una compresión triaxial de esfuerzos controlados (Figura 5.8).

En un inicio (punto A), la muestra de suelo se encuentra en equilibrio drenado bajo una presión de confinamiento inicial, con cero esfuerzo de corte (Figura 5.8 a y b) y cero exceso de presión de poros (Figura 5.8 c). Debido a que su estado inicial se encuentra por encima de la línea de estado constante (Figura 5.8 d), el suelo exhibirá un comportamiento de contracción.

Cuando el corte no drenado se inicia, la contracción genera un exceso de presión de poros lo suficiente como para movilizar la resistencia del suelo a su valor máximo (punto B), el cual ocurre en una pequeña deformación. En este punto B la presión de poros es relativamente pequeña y la muestra de suelo se vuelve inestable y colapsa. Como la muestra se deforma desde el punto B al C, el exceso de presión de poros incrementa dramáticamente. En el punto C y más allá de él, la muestra de suelo se encuentra en estado constante de deformación, donde la presión efectiva de confinamiento es sólo una fracción pequeña de la inicial. El flujo por licuación fue iniciado en el instante en que la muestra de suelo llegó a ser irreversiblemente inestable (punto B).

[11] Fuente: Kramer, S. "Geotechnical Earthquake Engineering"

Si ahora consideramos la respuesta de una serie de muestras de suelo triaxiales inicialmente consolidadas a igual relación de vacíos a diferentes presiones efectivas de confinamiento, tendremos que todos las muestras de suelo alcanzarán la misma presión de confinamiento en su estado constante de deformación, pero lo harán por diferentes caminos de esfuerzos.

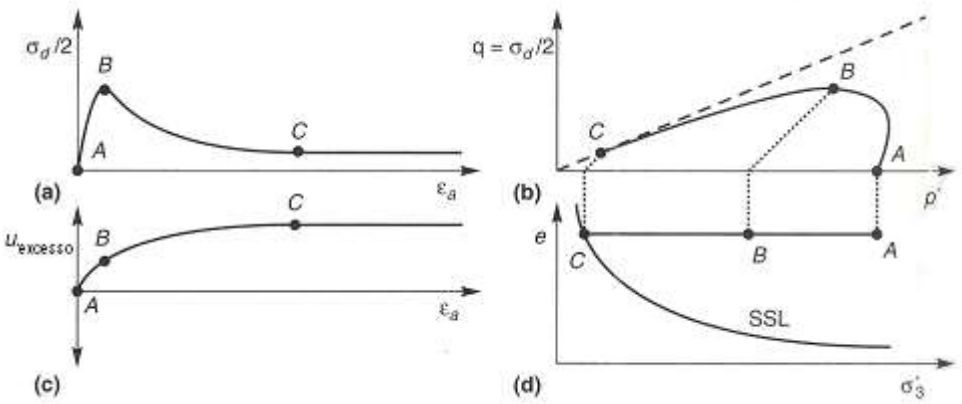


Figura 5.8 Respuesta de una muestra de suelo consolidado isotrópico de arena suelta saturada [11].- a) curva Esfuerzo-Deformación, b) camino de esfuerzos efectivos, c) exceso de presión de poros, d) presión efectiva de confinamiento

La figura 5.9 presenta muestras de suelo A y B debajo de SSL en su estado inicial, por lo que se dilatarán al ser cortados; muestras C, D y E se contraerán, alcanzando un máximo esfuerzo no drenado después del cual se deformarán rápidamente en dirección del estado constante de deformación. Para C, D y E el flujo por licuación es iniciado en el valor máximo de cada camino de esfuerzos. Estos puntos forman una línea recta (línea punteada) que pasa por el origen y que definen la superficie de flujo por licuación (FLS).

Debido a que el flujo por licuación no puede ocurrir si el camino de esfuerzos está por debajo del punto de equilibrio, la FLS es truncada en este nivel (Figura 5.10).

5.3.1.2 Carga cíclica

Consideremos la respuesta de dos muestras de suelo idénticas triaxiales, consolidadas anisotrópicas de arena suelta saturada (figura 5.11). Inicialmente, ambas muestras de suelo están en equilibrio drenado (punto A) bajo un esfuerzo de corte estático, que es mayor a la resistencia en estado constante de deformación, S_{su}.

La primera muestra es cargada uniformemente (bajo condición no drenada); la resistencia al corte genera un valor máximo cuando el camino de esfuerzos alcanza la FLS (punto B). En este punto la muestra se torna inestable y se deforma rápidamente en dirección al estado constante de deformación (punto C).

[11] Fuente: Kramer, S. "Geotechnical Earthquake Engineering"

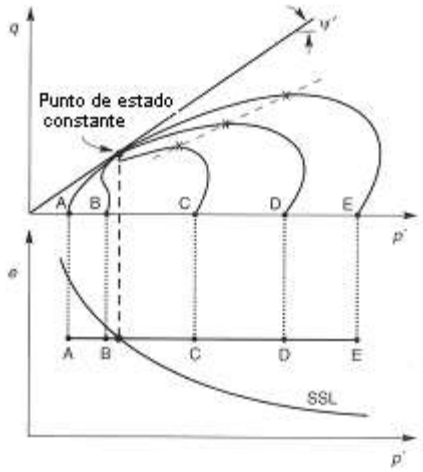


Figura 5.9 El flujo por licuación en muestras de suelo C, D y E es iniciado en los puntos marcados con "x". La línea punteada que pasa por estos puntos define la superficie de flujo por licuación, FLS [11]

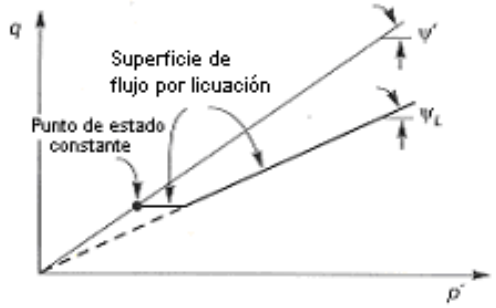


Figura 5.10 Superficie de licuación por flujo

La segunda muestra es cargada cíclicamente (también bajo condiciones no drenadas); el camino de esfuerzos efectivos se mueve hacia la izquierda como un exceso en la presión de poros y una acumulación permanente de deformación. Cuando el camino de esfuerzos efectivos alcanza la FLS (en el punto D), la muestra llega a ser inestable, deformándose con dirección al estado constante de deformación (punto C).

A pesar que las condiciones de presión efectiva en la iniciación de la licuación (puntos B y D) fueron diferentes, ambos casos cayeron en la FLS.

5.3.1.3 Desarrollo del flujo por licuación

El flujo por licuación ocurre en dos etapas. La primera toma lugar a pequeños niveles de deformación y envuelve la generación de exceso de presión de poros lo suficiente como para mover el camino de esfuerzos de su estado inicial a la posición de la FLS. Este exceso de presión de poros puede ser generado bajo cargas no drenadas uniformes y cíclicas. Cuando el camino de esfuerzos efectivos alcanza la FLS, el suelo se vuelve inherentemente inestable y la segunda etapa empieza, con una deformación que es conducida por el esfuerzo de corte requerido para el equilibrio estático.

[11] Fuente: Kramer, S. "Geotechnical Earthquake Engineering"

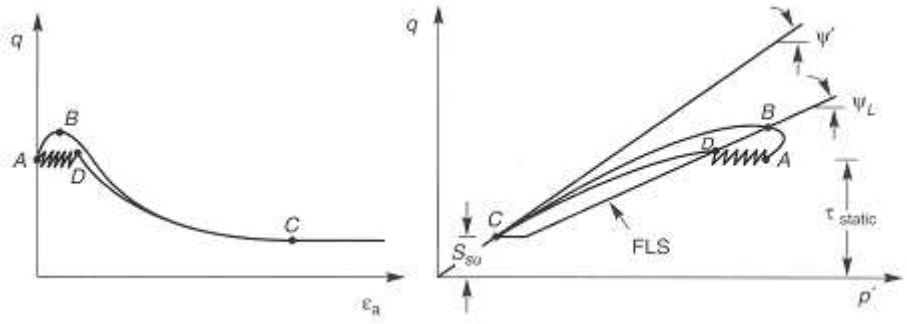


Figura 5.11 Iniciación de licuación por carga uniforme y cíclica [11]

5.3.2 Influencia del exceso de presión de poros

La generación de exceso de presión de poros es la clave para la iniciación de la licuación. Sin cambios en la presión de poros, por tanto, cambios en el esfuerzo efectivo, ni flujo por licuación, ni movilidad cíclica pueden ocurrir. Sin embargo, cada fenómeno requiere diferentes niveles de presión de poros para activarse.

5.3.2.1 Flujo por licuación

El flujo por licuación puede ser iniciado por una carga cíclica sólo cuando el esfuerzo de corte requerido para el equilibrio estático es más grande que el esfuerzo de estado constante de deformación. En el campo, estos esfuerzos de corte son causados por la gravedad y se mantienen constantes hasta que se desarrollen grandes deformaciones. El flujo por licuación, sin embargo, requiere una de una perturbación lo suficientemente fuerte en condiciones no drenadas para mover el camino de esfuerzos efectivos de su estado inicial a la FLS. Estados iniciales que caigan dentro de la región sombreada (Figura 5.12) son susceptibles a flujo por licuación.

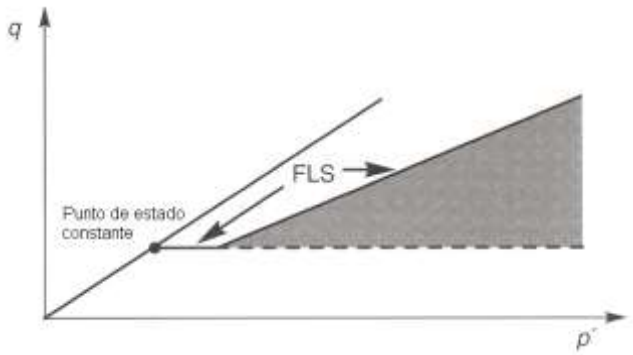


Figura 5.12 Zona susceptible a flujo por licuación, si la condición inicial del suelo cae dentro la región sombreada [11]

Si las condiciones de esfuerzo inicial se encuentran cerca de la FLS, como aquellos elementos de suelo sujetos a grandes esfuerzos de corte bajo condiciones drenadas, el flujo por licuación puede ser activado por un poco exceso en la presión de poros. La resistencia a la licuación será mayor si las condiciones iniciales de esfuerzo se encuentran lejos de la superficie de flujo por licuación (FLS).

[11] Fuente: Kramer, S. "Geotechnical Earthquake Engineering"

5.3.2.2 Movilidad cíclica

A diferencia del flujo por licuación, la movilidad cíclica puede desarrollarse cuando el esfuerzo de corte estático es menor que el esfuerzo en estado constante de deformación, originando permanentes tensiones y deformaciones. Aquellos estados iniciales que caigan dentro de la región sombreada (Figura 5.13) son susceptibles a movilidad cíclica. Nótese que la movilidad cíclica puede ocurrir en suelos densos y sueltos. La región sombreada de la figura 5.13 se extiende desde muy baja a muy alta presión efectiva de confinamiento y corresponde a estados que pueden caer por encima o debajo de la SSL.

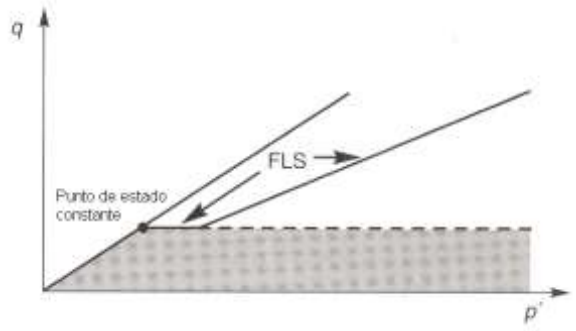


Figura 5.13 Zona susceptible a movilidad cíclica, si la condición inicial del suelo cae dentro la región sombreada [11]

En contraste con el flujo por licuación, no está claro en que punto la movilidad cíclica es iniciada.

Su magnitud depende del esfuerzo de corte y de la duración del movimiento del suelo. Para movimientos de corta duración cerca de sitios casi planos, las deformaciones permanentes podrían ser pequeñas. Para sitios moderadamente inclinados o suavemente inclinados sujetos a movimientos de larga duración, el movimiento cíclico puede producir deformaciones perjudiciales en el suelo.

5.4 Evaluación del potencial de licuación

A través de los años ha sido desarrollado un cierto número de enfoques para la evaluación del potencial de licuación. Los más comunes son el enfoque de esfuerzo cíclico y el enfoque de deformación cíclica, presentando cada uno ventajas y desventajas.

Es oportuno mencionar que existen otros enfoques, aparte de estos dos, como el de disipación de energía, el de análisis de respuesta basado en esfuerzos efectivos y el enfoque probabilístico.

5.4.1 Enfoque de esfuerzo cíclico

El enfoque de esfuerzo cíclico es conceptualmente simple: la carga inducida por el sismo es expresada en términos de esfuerzos de corte cíclicos, y es comparada con la resistencia del suelo a la licuación, que también es expresado en términos de esfuerzos de corte cíclicos. En ubicaciones donde la carga exceda la resistencia se espera que la licuación ocurra.

[11] Fuente: Kramer, S. “Geotechnical Earthquake Engineering”

5.4.1.1 Caracterización de la carga sísmica

El nivel de exceso de presión de poros requerido para iniciar la licuación está relacionada a la amplitud y duración de la carga cíclica inducida por el sismo. El enfoque de esfuerzo cíclico está basado en la suposición que la generación del exceso de presión de poros está fundamentalmente relacionada a los esfuerzos de corte cíclicos, por tanto, la carga sísmica es expresada en términos de esfuerzos de corte cíclico. La carga puede ser prevista de dos formas: por un análisis detallado de las respuestas del suelo o por una propuesta estimativa.

Seed y otros aplicaron un procedimiento de medición a un grupo de esfuerzos de corte en el tiempo, en registros de fuertes movimientos del suelo, para determinar el número de esfuerzos cíclicos uniformes, Neq (en una amplitud del 65% del máximo esfuerzo de corte cíclico, esto es $\tau_{cyc} = 0.65\ \tau_{max}$) que produjera un incremento de presión de poros equivalente a aquellos irregulares en el tiempo (Figura 5.14).

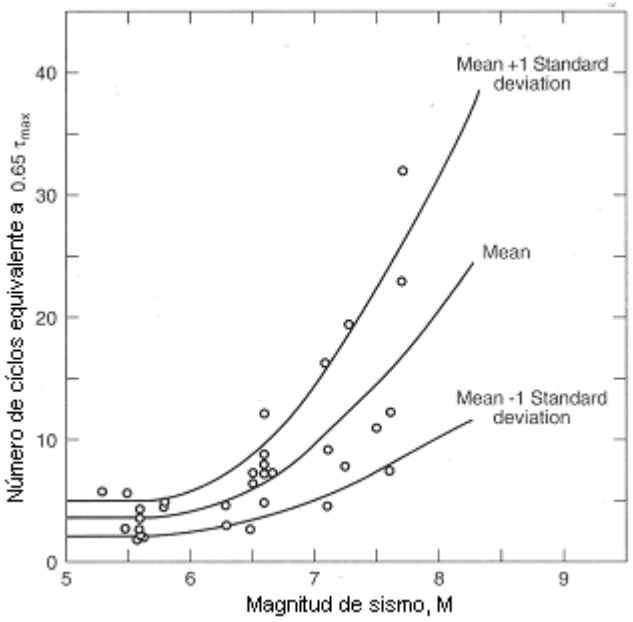


Figura 5.14 Número de ciclos equivalentes, N_{eq}, para sismos de diferente magnitud

De no contar con un registro de esfuerzos de corte cíclico en el tiempo, la amplitud del esfuerzo de corte cíclico uniforme para sitios planos (o suavemente inclinados) pueden ser estimados por un procedimiento simplificado como:

$$\tau_{cyc} = 0.65 a_{max} \sigma_v r_d / g$$

Donde:
τ_{cyc} : esfuerzo de corte uniforme
a_{max} : máxima aceleración en la superficie del suelo
g : aceleración de la gravedad
σ_v : presión vertical total
r_d : factor de reducción de esfuerzos a la profundidad de interés (Figura 5.15)

Iwasaki estableció la siguiente expresión para calcular "r_d"

$r_d = 1 - 0.015z$

Donde "z" es la profundidad en metros

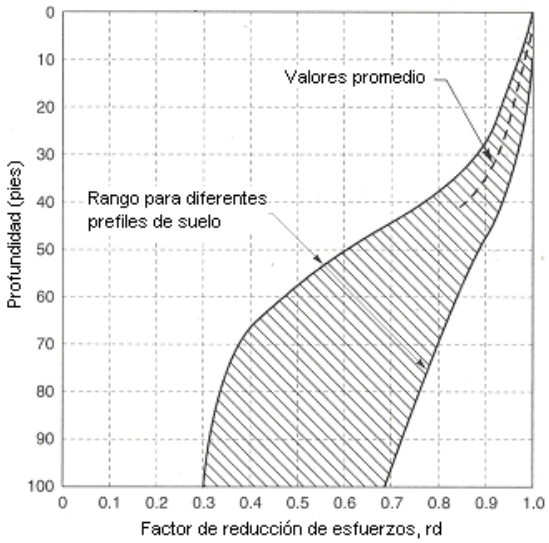


Figura 5.15 Factor de reducción de esfuerzos, r_d [11]

5.4.1.2 Caracterización de la resistencia a la licuación

La resistencia a la licuación de un suelo depende de que tan cerca se encuentra el estado inicial del suelo al estado correspondiente de falla, y de la naturaleza de la carga requerida para moverla de su estado inicial al estado de falla.

En el campo, donde rara vez el exceso de presión de poros es medido, es difícil distinguir entre los diferentes fenómenos de licuación después que haya ocurrido el sismo.

La caracterización de la resistencia a la licuación es desarrollada a través de dos líneas: métodos basados en pruebas de laboratorio, y métodos basados en pruebas de campo y observaciones de la actividad de licuación en sismos pasados.

- **Caracterización basada en pruebas de laboratorio**

Pruebas de laboratorio mostraron que el número de ciclos de carga requeridos para producir la falla de licuación, N_L, disminuye con la amplitud del esfuerzo de corte y con las disminución de la densidad. La relación entre densidad, amplitud del esfuerzo cíclico, y el número de ciclos para la falla de licuación puede ser graficada en curvas de resistencia cíclica. Estas curvas son frecuentemente estandarizadas para producir una relación de esfuerzo cíclico (CSR) mediante una presión de sobrecarga inicial.

Para pruebas de esfuerzo cortante cíclico simple (CSR_{ss}) tenemos:

$CSR_{ss} = \tau_{cyc} / \sigma'_{v0}$

[11] Fuente: Kramer, S. "Geotechnical Earthquake Engineering"

Donde:
τ_{cyc} : esfuerzo de corte uniforme
σ'_{v0} : presión efectiva vertical inicial

Para pruebas cíclicas triaxiales (CSR_{tx}) tenemos:

$CSR_{tx} = \sigma_{dc} / 2\sigma'_{3c}$

Donde:
σ_{dc}: máximo esfuerzo de corte
σ'_{3c} : presión efectiva inicial de confinamiento

además ambas pruebas pueden ser relacionadas de la siguiente forma:

$CSR_{ss} = C_r CSR_{tx}$

Donde:
C_r : factor de corrección (Tabla 5.3)

Tabla 5.3 Factor de corrección[11], C_r

		C_r para:	
Referencia	Ecuación	$K_0 = 0.4$	$k_0 = 1.0$
Finn y otros (1971)	$C_r = (1+k_0)/2$	0.7	1.0
Seed y Peacock (1971)	Varía	0.55 - 0.72	1.0
Castro (1975)	$C_r = 2(1+2k_0)/(3x3\text{^}1/2)$	0.69	1.15

En contraste con las pruebas de esfuerzo cortante cíclico simple y las triaxiales, los sismos producen esfuerzos de corte en diferentes direcciones, causando un incremento de presión de poros más rápido que los movimientos unidireccionales de estas pruebas. Seed y otros (1975b) sugirieron que el CSR requerido para producir el inicio de la licuación en el campo era cerca de 10% menos que el requerido para la prueba unidireccional de esfuerzo cortante cíclico simple, por lo que:

$CSR_{field} = 0.9CSR_{ss} = 0.9C_r CSR_{tx}$

- **Caracterización basada en pruebas in situ**

Casos previos de licuación en la historia pueden ser caracterizados por la combinación de los parámetros de carga y los parámetros de resistencia a la licuación. Estas combinaciones pueden ser graficadas mediante símbolos que indiquen si la licuación fue observada o no.

En este enfoque, la relación de esfuerzo cíclico es usada como parámetro de carga; y como parámetro de resistencia a la licuación se toman los parámetros in situ, los cuales reflejan las características de densidad y generación de presión de poros.

[11] Fuente: Kramer, S. "Geotechnical Earthquake Engineering"

Por contar el LEMC con una gran cantidad de pruebas de campo basadas en el ensayo de penetración estándar (SPT), la presente tesis tomará la caracterización basada en pruebas in situ SPT como medio para evaluar el potencial de licuación.

Prueba de penetración estándar, SPT

En los Estados Unidos como en muchos países, el ensayo de penetración estándar (SPT) a sido la prueba más usada para la caracterización de la resistencia a la licuación. Seed y otros compararon la resistencia corregida N_1 del SPT y la relación de esfuerzo cíclico para arenas limpias y arenas limosas (Figura 5.16) para suelos planos y depósitos superficiales, en el cual se había observado o no, licuación en sismos de magnitud M=7.5; y poder determinar la mínima relación de esfuerzos cíclicos en el cual la licuación pudiera ser esperada.

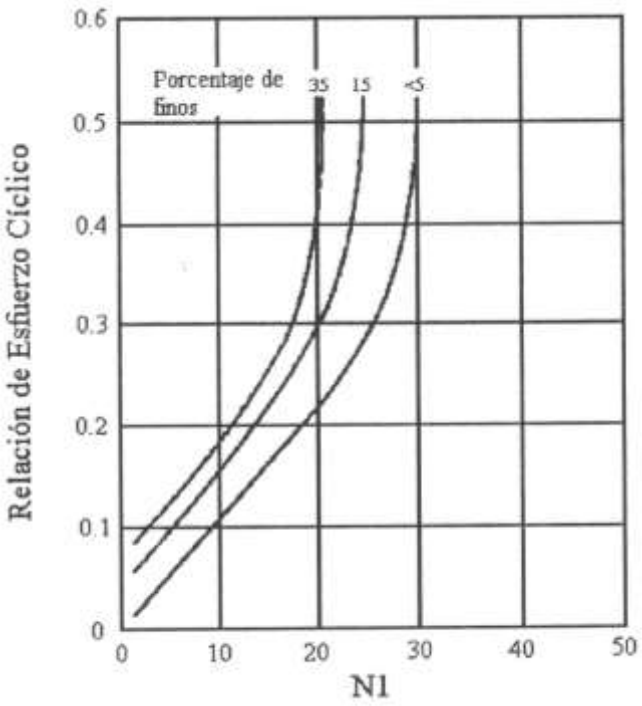


Figura 5.16 Relación entre límites de esfuerzos cíclicos que causan licuación y valores N_1 en arenas limosas para un sismo de magnitud M = 7.5

El valor N_1 es calculado de la siguiente manera:

$N_1 = C_N N$

Donde:
N : valores de la resistencia a la penetración
C_N : factor de corrección (Figura 5.17)

Analíticamente LIAO y WHITMAN establecieron la siguiente relación para evaluar C_N:

$C_N = (1/\sigma'_{v0})^{1/2}$

Donde:
σ'_{v0} en kg/cm^2

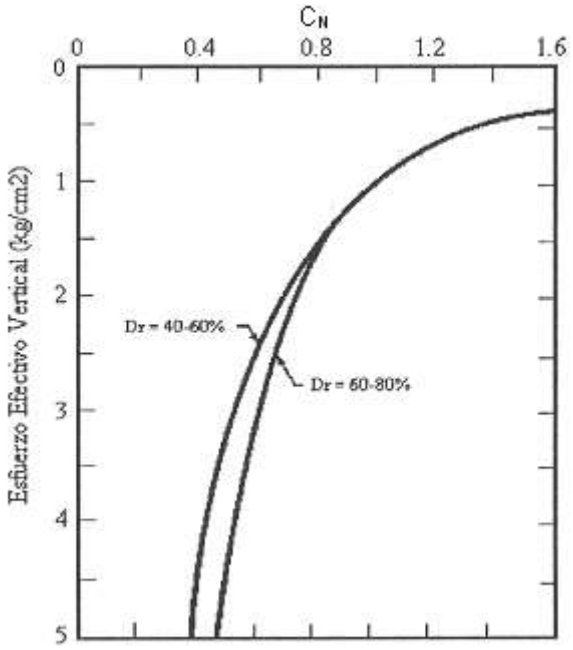


Figura 5.17 Factor de corrección de sobrecarga, C_N

Estudios post-sísmicos de campo de diferentes países han fijado una tabla de comparación de valores, N, del SPT con ciertos valores, N críticos, susceptibles a licuación. Ver figura 5.18.

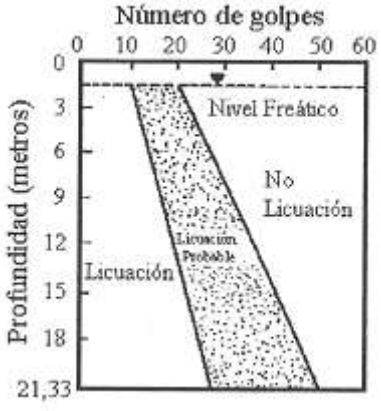


Figura 5.18 Valores N críticos para SPT

Otros estudios presentan que depósitos de suelos a profundidades mayores de 15 metros son difíciles de licuar, debido a la presión de confinamiento del suelo que existe a esa profundidad.

La presencia de finos puede afectar la resistencia al SPT, por lo tanto, debería ser considerado en la evaluación de la resistencia a la licuación. Se observó que la resistencia a la licuación de arenas no es influenciada por los finos a menos que estos comprendan más

del 5% del suelo. Una mayor presencia de contenido de finos tiende a inhibir la licuación (esto es, el CSR requerido para iniciar la licuación).

La plasticidad de los finos también puede influenciar en la resistencia a la licuación; la adhesión de finos plásticos tiende a resistir el movimiento relativo de las partículas individuales del suelo con lo cual, reduce la generación de exceso de presión de poros durante el sismo. Ishihara sugiere que el efecto del índice de plasticidad (IP) puede ser tomado en cuenta multiplicando el CSR por el factor F:

F = 1.0 IP<=10
F = 1.0 + 0.022(IP-10) IP>10

Debido que la duración de fuertes movimientos incrementa con la magnitud del sismo, la mínima relación de esfuerzos cíclicos requerido para iniciar la licuación disminuye al incrementar la magnitud. La mínima relación de esfuerzos cíclicos para otras magnitudes pueden ser obtenidas multiplicando la relación de esfuerzos cíclicos para sismos de magnitud M = 7.5 por los factores mostrados en la tabla 5.4

Tabla 5.4 Factor de corrección de magnitud para el enfoque de esfuerzo cíclico

Magnitud, M	Factor de Corrección $CSR_M / CSR_{M=7.5}$
8.50	0.89
7.50	1.00
6.75	1.13
6.00	1.32
5.25	1.50

5.4.1.3 Evaluación del potencial de licuación

Una vez que los esfuerzos inducidos por los sismos y la resistencia de los suelos hayan sido caracterizados, es posible conocer el potencial de licuación.

Según los conocimientos que se tienen en cuanto a licuación, el potencial de licuación queda reducido a la comparación de los esfuerzos inducidos por los sismos y la resistencia a través del comportamiento del suelo. El potencial de licuación puede ser representado a profundidades donde la solicitación exceda la resistencia o mediante un factor de seguridad, FS, expresado como sigue:

$FS_L = \tau_{cyc,L} / \tau_{cyc} = CSR_L / CSR$

5.4.2 Enfoque de deformación cíclica

Dobry y Ladd, Dobry y otros describieron un enfoque que empleaba la deformación o tensión cíclica para caracterizar la carga inducida por el sismo y la resistencia a la licuación, en lugar de emplear el método de esfuerzos cíclicos. Este enfoque es basado en evidencia experimental que muestra que la densificación de arenas secas son controladas por deformaciones cíclicas más que por el esfuerzo cíclico, y por la existencia de un límite o umbral de deformación volumétrica por corte bajo el cual la densificación no ocurre.

Este enfoque de deformación cíclica requiere de una serie de ensayos de laboratorio para determinar los parámetros que influyen en la evaluación del potencial de licuación. De otro lado, por contar el LEMC con información basada en pruebas de campo, este enfoque no será ampliado en este presente estudio.

5.5 Procedimiento para la evaluación del potencial de licuación

El procedimiento en la presente tesis corresponderá a la aplicación del enfoque basado en esfuerzos cíclicos, criterios geológicos y de composición y pruebas de campo SPT para la caracterización de la resistencia del suelo a la licuación.

Una vez caracterizadas las solicitaciones inducidas por el sismo y la caracterización de la resistencia del suelo frente a una solicitación dada, se procederá a evaluar el potencial según lo descrito en el enfoque de esfuerzos cíclicos.

5.6 Evaluación del riesgo potencial de licuación en el área de estudio

La ubicación y localización de los estudios de mecánica de suelos (SPT, calicatas) y los niveles de agua de la red piezométrica del año 1970 en un sistema de coordenadas, permitió realizar un análisis empleando los SIG y poder dejar en manifiesto que la ciudad de Piura puede ser susceptible de sufrir el fenómeno de licuación.

- **Configuración geomorfológica**

La visualización de la geomorfología de la ciudad de Piura en 3D, muestra una superficie de suaves ondulaciones, de una inclinación natural con tendencia hacia el Sudeste y de zonas topográficas claramente marcadas como zonas bajas y altas.

Como se mencionó anteriormente no se presenta, impreso, una vista 3D en este estudio, por ello se invita al usuario y público interesado en animarse a explorar las ventajas de utilizar un SIG. De otro lado, el plano N3 da una idea general de la forma de la superficie del suelo de la ciudad de Piura.

- **Composición del suelo**

Evidencias encontradas en los SPT y calicatas dentro de la ciudad de Piura, mostraron una litología formada por suelos granulares sueltos, uniformemente gradados y de potencia variable según el proceso de geodinámica externa que formó estos suelos (como los médanos y la posibilidad de existencia de un paleo cauce).

- **Presencia de napa freática**

La presencia de napa freática a profundidades variables en los SPT, puso de manifiesto que en ciertas zonas de la ciudad de Piura el nivel freático se encontró muy cerca de la superficie. Esto puede ser atribuido a las condiciones topográficas donde se realizó el SPT, al tipo de suelo y época del año de realizado el estudio.

La ubicación de los puntos piezométricos efectuados en el año 1970 y su información claramente referida a un sistema de coordenadas, permitió visualizar y comprender, la posición de la napa freática en aquel año. De esta manera, correlacionada con los niveles topográficos de la ciudad, se pudo observar aquellas zonas vulnerables a una eventual elevación de la napa freática.

- **Sismicidad**

Por último la ciudad de Piura y en general la costa peruana forma parte de lo que se conoce como " El Gran Cinturón de Fuego del Pacífico", una franja sísmica muy activa, en el cual se detecta la mayor actividad sísmica en el mundo, exponiéndola de esta manera, a sismos de gran intensidad.

5.6.1 Elección de la magnitud y la aceleración sísmica

Los valores probables de intensidades sísmicas en una región se determinan a partir de un estudio probabilístico. Este estudio consiste en la revisión de las características tectónicas de la región y la actividad sísmica en el pasado para definir las fuentes sismogénicas. Posteriormente se determina la recurrencia o características sísmicas de cada fuente y la atenuación sísmica o parámetros sísmicos del suelo. Finalmente la información sísmica obtenida es procesada a través de algún método analítico o computacional para obtener los valores probables de intensidades sísmicas.

La aceleración y magnitud representativas de una zona sísmica están relacionadas con el concepto de nivel de excedencia durante la vida útil de cierto tipo de obra. Se define como nivel de excedencia a la probabilidad de que en un tiempo dado ocurra un sismo de intensidad igual o mayor a una intensidad dada.

5.6.2 Elección de la profundidad del nivel freático

Con la facilidad de poder acceder a la información estructurada mediante el empleo de los Sistemas de Información Geográfica y, más aun, con la capacidad de poder visualizar la ubicación y distribución de los EMS (SPT y calicatas) y red piezométrica de 1970, se pudo conocer la profundidad a la cual se encontró el nivel freático.

De otro lado, si se consideran estos valores de profundidad de nivel freático para la evaluación del riesgo potencial de licuación, se deberá tener en cuenta la posibilidad de elevación de la napa freática en épocas lluviosas tipo El Niño.

La identificación de los niveles topográficos junto a la determinación de las alturas que cubrieron las zonas urbanas durante el Niño ha permitido identificar niveles freáticos y estimar el espesor de saturación del suelo y de los futuros afloramientos en superficie.

Por último, el análisis del potencial de licuación corresponde en primer lugar a la posición de los niveles freáticos obtenidos de los SPT. El segundo lugar corresponde a una estimación para aquellos SPT que por su ubicación geográfica son susceptibles a una elevación del nivel freático, naturaleza y configuración estructural del suelo.

5.6.3 Análisis del riesgo potencial de licuación

Lo descrito en el capítulo 4, dentro del análisis mediante el SIG, permite poder realizar un primer análisis de las zonas susceptibles a este fenómeno, tomando en cuenta la litología del suelo, los valores "N" obtenidos del SPT, zonas topográficas bajas susceptibles a inundación y la convergencia de cotas topográficas con cotas del escurrimiento de la napa freática.

Los ensayos de campo realizados a través de sondeos SPT fueron agrupados en una hoja de cálculo y con ellos se aplicó la metodología propuesta por Seed e Idriss. Este análisis se efectuó con la ayuda del programa LICUA.

El análisis del riesgo potencial de licuación se realizó mediante la selección de un sondeo por cada estudio de Mecánica de Suelos. Este sondeo corresponde a aquellos puntos más desfavorables, basados netamente en información de campo; es decir, aquellos sondeos con valores de resistencia a la penetración menores o iguales a los "N" críticos de la figura 5.18, considerando además, aquellos criterios litológicos y de composición.

Los casos considerados en la presente tesis corresponden a un valor de aceleración indicado por el Reglamento Nacional de Edificaciones, Norma E030 - Diseño Sismo Resistente. El área de estudio según esta norma corresponde a la Zona 03, cuyo valor de aceleración corresponde a 0.4g y, a la elección de una magnitud de 7.5 provenientes de un estudio probabilístico, cuyo nivel de excedencia es del 10% para un periodo de vida útil de 50 años, correspondientes a un sismo con periodo de retorno de 475 años.

La susceptibilidad a la licuación es representada mediante un factor de seguridad definido como:

FS > 1 No susceptible a licuar
FS < 1 Susceptible a licuar

5.6.4 Resultados del análisis del riesgo potencial de licuación

Las tablas 5.5 y 5.6 presentan el resumen de los resultados obtenidos por el programa LICUA. La primera para condiciones de nivel freático en el año al cual se realizó el SPT; y la segunda, para condiciones de elevación de nivel freático ante la eventualidad de la presencia de un periodo húmedo o por convergencia de niveles topográficos con los niveles de escurrimiento de la napa freática.

Las tablas B-1 del anexo B presentan la recopilación de la información obtenida por los SPT y que es la data de ingreso requerida por el programa Licua para el análisis del potencial de licuación.

Las tablas B-2 del anexo B muestran los resultados obtenidos por Licua de aquellos sondeos con factor de seguridad menores a uno, por lo que, el suelo tiene potencial de ser licuable.

El plano N9, presenta la ubicación de sólo aquellos SPT cuyo análisis resultó en un depósito de suelo con riesgo potencial de licuación dentro del plano de configuración geomorfológica del suelo de Piura. Se puede apreciar que la mayoría de sondeos susceptibles a este fenómeno se encuentran ubicados en una de las zonas topográficas más bajas de la ciudad y cuyas potencias de material suelto fueron de al menos 5 metros.

5.7 Comentarios

- La importancia y aplicación del GIS en este estudio es que permitió visualizar de forma global aquellos sondeos que por sus condiciones son susceptibles a licuación, seleccionándolos y analizando su potencialidad de licuación.

Permitió además, mediante la interpolación de los puntos piezométricos, poder estimar la profundidad del nivel freático en sondajes donde no se encontró presencia de agua en la fecha de realizada la exploración; y de aquellos en los que sí, poder ver si el nivel freático en el año 1970 fue mayor o menor al de los SPT y calicatas.

Si bien es cierto, dichos análisis se pudieron realizar sin emplear los SIG, como el realizado en la investigación de 1999, de los cuales se obtuvieron los mismos resultados. La diferencia de no emplear un SIG radica en que los resultados no ayudarían a formular un concepto global de por que esta afinidad a la licuación, y menos aún permitiría poder "aventurarse" a sugerir la ubicación de futuras exploraciones con fines de investigación.

No obstante, la presente investigación, no intenta quitar mérito a investigaciones pasadas, por el contrario intenta presentar e introducir una herramienta de vanguardia en la comprensión de factores que inducen riesgo, para que se tomen medidas de prevención y mitigación.

Tabla 5.5 Resumen de resultados. Análisis del nivel freático obtenidos de los SPT y aceleración máxima 7.5.

EMS	Aceleración Máxima Superficial para M=7.5 a=0.4	Distrito
98_01	SL	Piura
98_02	NSL	Piura
98_03	NSL	Piura
99_09	NSL	Piura
2001_10	NSL	Piura
2001_12	NSL	Piura
2002_11	SL	Piura
2003_06	NSL	Piura
2004_01	NSL	Piura
2004_02	NSL	Piura
2004_03	NSL	Piura
2004_09	NSL	Piura
2004_09A	NSL	Piura
2005_07	NSL	Piura
2005_11	NSL	Piura
2006_401	NSL	Piura
2006_405	NSL	Piura
2006_406	NSL	Piura
2006_413	SL	Piura

Donde NSL representa la no-susceptibilidad a licuación y SL la susceptibilidad a licuación

- Se tiene que dejar en claro que los resultados del análisis del potencial de licuación han sido hallados aplicando el enfoque de esfuerzo cíclico, tomando en cuenta, solamente, aquellos criterios geológicos, de composición y valores N de los SPT, pues fue la información con la que se contó y cuenta en la ciudad de Piura. Por tanto, se debe entender que aquellos sondeos en los que el programa "Licua" arrojó como no licuables deben ser considerados en futuras investigaciones.

Tabla 5.6 Resumen de resultados. Análisis del nivel freático elevado y aceleración máxima 7.5.

EMS	Aceleración Máxima Superficial para M=7.5 a=0.4	Distrito
87_25	NSL	Piura
87_37	NSL	Piura
93_04	NSL	Piura
94_22	NSL	Piura
95_23	NSL	Piura
99_01	NSL	Piura
2001_12	SL	Piura
2004_01	SL	Piura
2004_02	SL	Piura
2004_09A	SL	Piura
2005_11	NSL	Piura

Donde NSL representa la no-susceptibilidad a licuación y SL la susceptibilidad a licuación

Tanto aquellos sondeos, en los que la presente tesis arrojaron potencialidad de licuación, como los que no, deben ser analizados nuevamente considerando todos los criterios y pruebas de laboratorio descritos en el presente capítulo. Por esta razón, se creyó conveniente no presentar un plano de zonificación de áreas potencialmente licuables en la ciudad de Piura, pues la información con la que se cuenta, no es suficiente para una zonificación con miras a la prevención de riesgos.

De esta forma también se evitará que aquellos sondajes en los que el análisis arrojó como no licuables, puedan ser interpretados como tales, pues no es fácil afirmar su potencialidad en base a la información con la que se cuenta.

Esta carencia de información, no le quita crédito a la aplicación dada a los Sistemas de Información Geográfica con miras a la prevención de riesgos geotécnicos, si no más bien es un incentivo para futuros investigadores y entidades competentes que con un poco más de recursos, puedan realizar pruebas de laboratorio triaxiales para determinar el estado inicial del suelo (véase criterios de estado, sección 5.2.4)

- En el año 2007 (octubre / noviembre), como parte de la formación académica de los futuros ingenieros civiles de la UDEP en la realización de ensayos SPT, dentro del curso de Cimentaciones; el futuro docente, investigador e Ingeniero José Ordinola E., con apoyo del tesista, vio la necesidad de emplear la primera versión del SIG creado, para determinar en que zonas de la ciudad de Piura existe poca densidad de exploraciones y así fortalecer su data y la del laboratorio.

  Con el espíritu investigador de José y de mi persona, se seleccionaron aquellas áreas con poca densidad de estudios.

  Buscando sacar el mayor provecho a cada exploración y con la inquietud de corroborar los resultados de esta tesis, las exploraciones fueron seleccionadas en lugares estratégicos en los que se presume y no potencial de licuación, según la cercanía a aquellos sondajes en los que si se cuenta información (ver plano 8).

Las zonas analizadas se presentan en la tabla 5.7

Tabla 5.7 Selección de zonas para pruebas de campo SPT

Zona	Detalle	Potencial de licuación esperada *
Urb. Ignacio Merino	No existe EMS	No
Urb. El Chilcal	No existe EMS	No
Urb. Santa Isabel	No existe EMS	Sí
Urb. Angamos	No existe EMS	Sí
Urb. Los Cocos del Chipe	No existe EMS	Sí

* Resultados de sondeos cercanos al área en estudio, según la información (1985 - 2006) y análisis de potencial de licuación realizado.

En el presente estudio no se detallan las coordenadas de los sondeos realizados, pues fueron realizados en un periodo posterior a la elaboración de la presente investigación; sin embargo, se pudo rescatar los primeros resultados de dichas exploraciones.

Los resultados de dicha indagación se presentan en la tabla 5.8

Tabla 5.8 Resultados de pruebas SPT

Zona	Detalle	Potencial de licuación
Urb. Ignacio Merino	01 EMS	*No*
Urb. El Chilcal	01 EMS	*No*
Urb. Santa Isabel	01 EMS	*Sí*
Urb. Angamos	01 EMS	*Sí*
Urb. Los Cocos del Chipe	01 EMS	*Sí*

Estos estudios cumplieron los siguientes dos objetivos:

Fortalecer la densidad y dispersión de estudios de mecánica de suelos en la ciudad de Piura, en zonas donde no se cuenta con información.

El SIG creado permitió estimar que zonas pueden ser susceptibles a licuación. La tabla 5.8 confirma aquella estimación.

- Si bien es cierto no se ha explotado toda la potencialidad de los Sistemas de Información Geográfica como cuando se crea un modelo en base a la información disponible, se espera que el presente estudio sea un incentivo para que futuros alumnos, tesistas y catedráticos se animen a continuar con este primer paso de formular un plan de prevención de riesgos, desde el punto de vista de la Ingeniería Geotécnica.

- Por último, se intenta cambiar la idea que los fenómenos relacionados a la licuación sólo ocurren en suelos de material suelto; y de ampliar el conocimiento que dicho fenómeno sólo es desarrollado por sismos. Por tanto, se aclara que la licuación puede ocurrir tanto en suelos sueltos como en densos, por sismos o sin ellos.

Conclusiones

- Queda de manifiesto la importancia del empleo de los Sistemas de Información Geográfica como herramienta para la correlación de niveles temáticos para la determinación de factores como la geomorfología, niveles freáticos, litología del suelo que puedan inducir riesgos, cara a su prevención.

- Según los criterios geológicos, de composición del suelo y valores N de los SPT dentro de las zonas analizadas en la ciudad de Piura, se pone de manifiesto la potencialidad de la ciudad de Piura de sufrir riesgos geotécnicos relacionados a la deformación del suelo: Licuación

- Según el "Estudio de drenaje de la ciudad de Piura" y por medio de la interpolaciones realizadas con ayuda del SIG creado, se concluye que para el año 1970, la dirección de flujo de la napa freática fue de forma radial, en dirección al río Piura y Suroeste de la ciudad.

Recomendaciones

Sentar la normativa a nivel local y regional del sistema de coordenadas geográficas a ser empleado en todo proyecto, acorde a los últimos avances tecnológicos y sistema sugerido por la ITRS a través del SIRGAS, "WGS84".

Realizar un levantamiento topográfico general de la ciudad y alrededores, debidamente ajustados a una red de Geodesia o puntos de control, empleando Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), para que sean utilizados como base inamovible e indispensable de todo proyecto relacionado con las Ciencias Aplicadas a la Ingeniería.

Realizar un levantamiento catastral de la ciudad de Piura, debidamente localizado en un sistema de coordenadas basado en el "WGS84", para contar con un plano urbanístico de la ciudad y junto al levantamiento topográfico, sentar las bases para formular estudios y proyectos de expansión urbana, zonificación y uso del suelo, acordes a los requerimientos futuros a los cuales la ciudad de Piura tendrá que afrontar.

Establecer un plan piezométrico y geofísico para conocer las condiciones hidrodinámicas reales, que permitan establecer medidas de prevención y atenuación frente a riesgos geotécnicos, efectuando un "Plan de Drenaje" para la ciudad de Piura a fin de atenuar el riesgo potencial de licuación

Realizar pruebas de laboratorio a muestras de depósitos de suelos en los cuales se detectó o no riesgos potenciales de licuación, recomendando pruebas triaxiales para determinar la "relación de vacíos crítica" y "estado constante de deformación".

Debido a la carencia de un seguimiento de la fluctuación del nivel freáticos después del año 1970 en la ciudad de Piura, se recomienda implementar la data con la contribución de los Sistemas de Información Geográfica, de todos los niveles freáticos, independientemente de la institución a la cual pertenezcan, para determinar las profundidades de los niveles freáticos encontrados y aplicarlos a la prevención de riesgos y fines que se crean convenientes.

Bibliografía

1. Centro Peruano de Estudios Sociales (CEPES) [en línea]. Disponible en: http://www.cepes.org.pe/ (consulta: febrero 2008)

2. Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) [en línea]. Disponible en: http://desa.inei.gob.pe/mapas/bid/ (consulta: agosto 2007)

3. Palacios, Oscar. "Geología de los cuadrángulos de Paita, Piura, Talara, Sullana, Lobitos, Quebrada Seca, Zorritos, Tumbes, Zarumilla", Boletín Nº54, INGEMMET, 1994.

4. Murai, Shunji. "SIG, Manual base – conceptos fundamentales". Revista Selper, 1999, Vol. 15 Nº1, p 09 – 48.

5. Software ArcGIS. "ArcGIS Desktop Help". (disponible con el programa)

6. International Business Machines Corporations (IBM) Spatial Support for DB2 for z/OS. "User´s Guide and Reference" [en línea]. Disponible en: http://publib.boulder.ibm.com/infocenter/dzichelp/v2r2/topic/com.ibm.db29.doc.pdf/dsnspk11.pdf?noframes=true (consulta: Setiembre 2007)

7. Enviromental Systems Research Institute. Fundamentals of GIS data. "Georeferencing and coordinate systems" [en línea]. Disponible en: http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?tocVisable=1&ID=24&TopicName=Georeferencing%20and%20coordinate%20systems&pid=22 (consulta: Octubre 2007)

8. Dana, Peter. "Map Projection Overview" [en línea]. Disponible en: http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/mapproj/mapproj.html (consulta: Agosto 2007)

9. Lostao, Julio. y Cornejo, Arturo. "Estudio de Drenaje y Recuperación de Tierras", Centro de Drenaje y Recuperación de Tierras, 1970, tomo II.

10. Google Earth [software en línea]. Disponible en: http://earth.google.com/ (consulta: Abril 2007)

11. Kramer, Steven. “Geotechnical Earthquake Engineering”. Prentice-Hall, Inc. 1996, p. 209 – 210, 230 – 238, 348 – 419.

12. United States Geological Survey (USGS). “About liquefaction” [en línea]. Disponible en: http://geomaps.wr.usgs.gov/sfgeo/liquefaction/aboutliq.html (consulta: Setiembre 2007)

13. Jorgen, Johanson. “Soil liquefaction website” [en línea]. Disponible en http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/main.html (consulta: Agosto 200)

Lostao, Julio. y Cornejo, Arturo. “La Napa Freática en la ciudad de Piura (Estudio de Reconocimiento) ”, Centro de Drenaje y Recuperación de Tierras, 1970.

Parra, D y Vásquez, Hurtado. “Micro zonificación geotécnica de Pisco”. En: XII Congreso Nacional de Ingeniería Civil (1999:Huanuco)

Kuroiwa, Julio. “Algunos trabajos de investigación sobre Ingeniería Sismorresistente, microzonificación y planeamiento contra desastres naturales efectuados en el periodo 1978 – 1984”, Universidad Nacional de Ingeniería, 1985.

Alva, Jorge. “Licuación de suelos en el Perú”. En: IV Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones (1983: Lima)

Pinto, César. “Identificación de zonas con potencial de licuación de suelos en la ciudad de Piura con ensayos SPT”, Tesis para optar Título de Ingeniero Civil. Universidad de Piura, 1999

“Reglamento Nacional de Edificaciones”. Suplemento especial de El Peruano (Lima), 8 de junio de 2006.
Norma E050, suelos y cimentaciones
Norma E030, diseño sismoresistente

Sistemas de Información Geográfica (SIG) [en línea]. Disponible en: http://www.esri.com. (consulta: agosto 2007)

Instituto Geográfico Nacional (IGN) [en línea]. Disponible en: http://www.ign.gob.pe/ (consulta: setiembre de 2007)

Instituto Geofísico del Perú (IGP) [en línea]. Disponible en: http://www.igp.gob.pe/ (consulta: setiembre de 2007)

Enciclopedia virtual Wikipedia [en línea]. Disponible en : http://wikipedia.org/ (consulta: agosto-octubre de 2007)

Anexo A

Planos

N

Leyenda

- Plano de Piura y Castilla
- Area de estudio

500 0 500 1,000 Metros

	fecha	nombre
Dibujado	Nov 07	FerAsc
Rvdo.	Nov 07	WCC

UNIVERSIDAD DE PIURA

PROGRAMA ACADEMICO DE INGENIERIA CIVIL

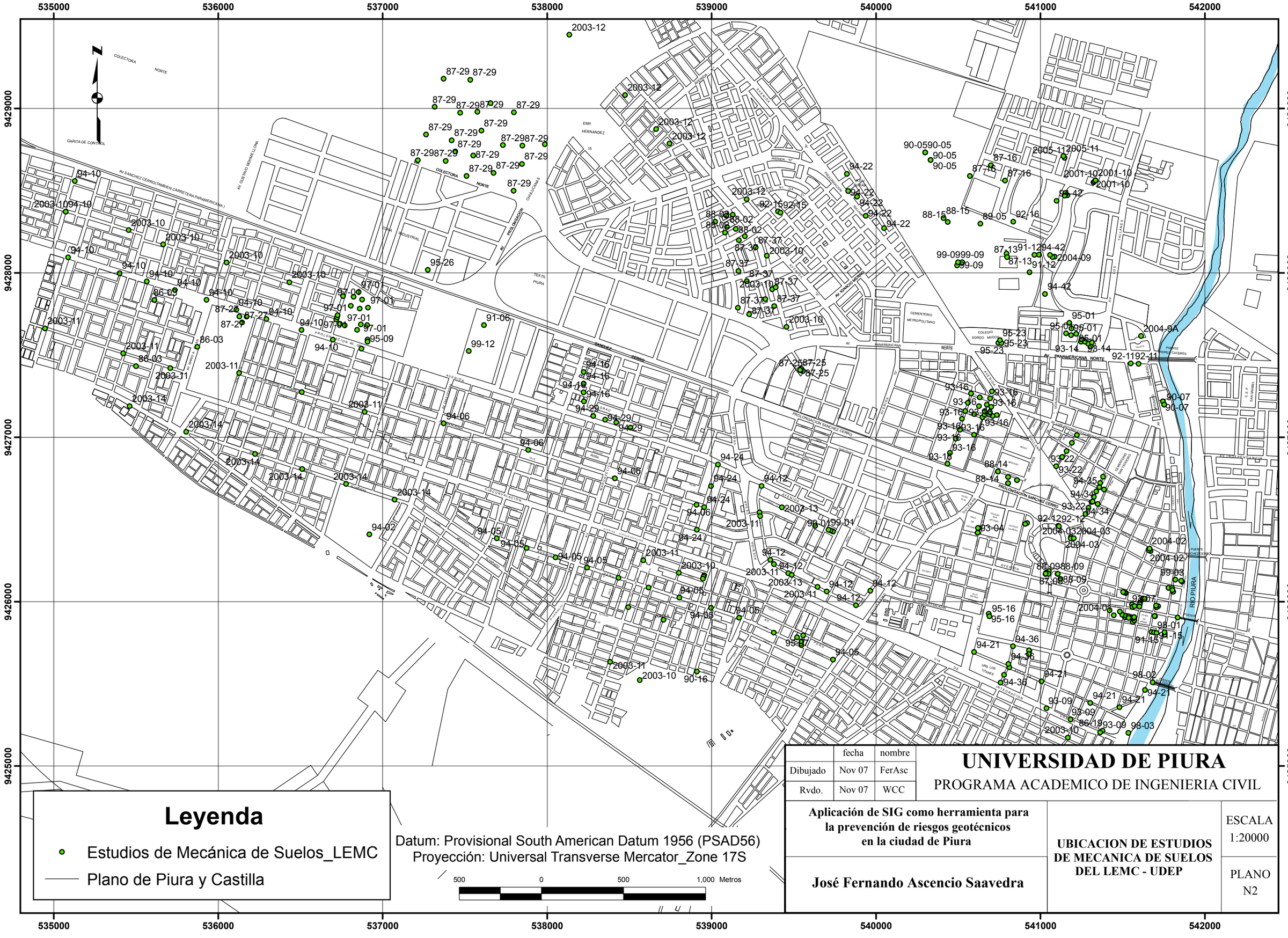
Aplicación de SIG como herramienta para la prevención de riesgos geotécnicos en la ciudad de Piura

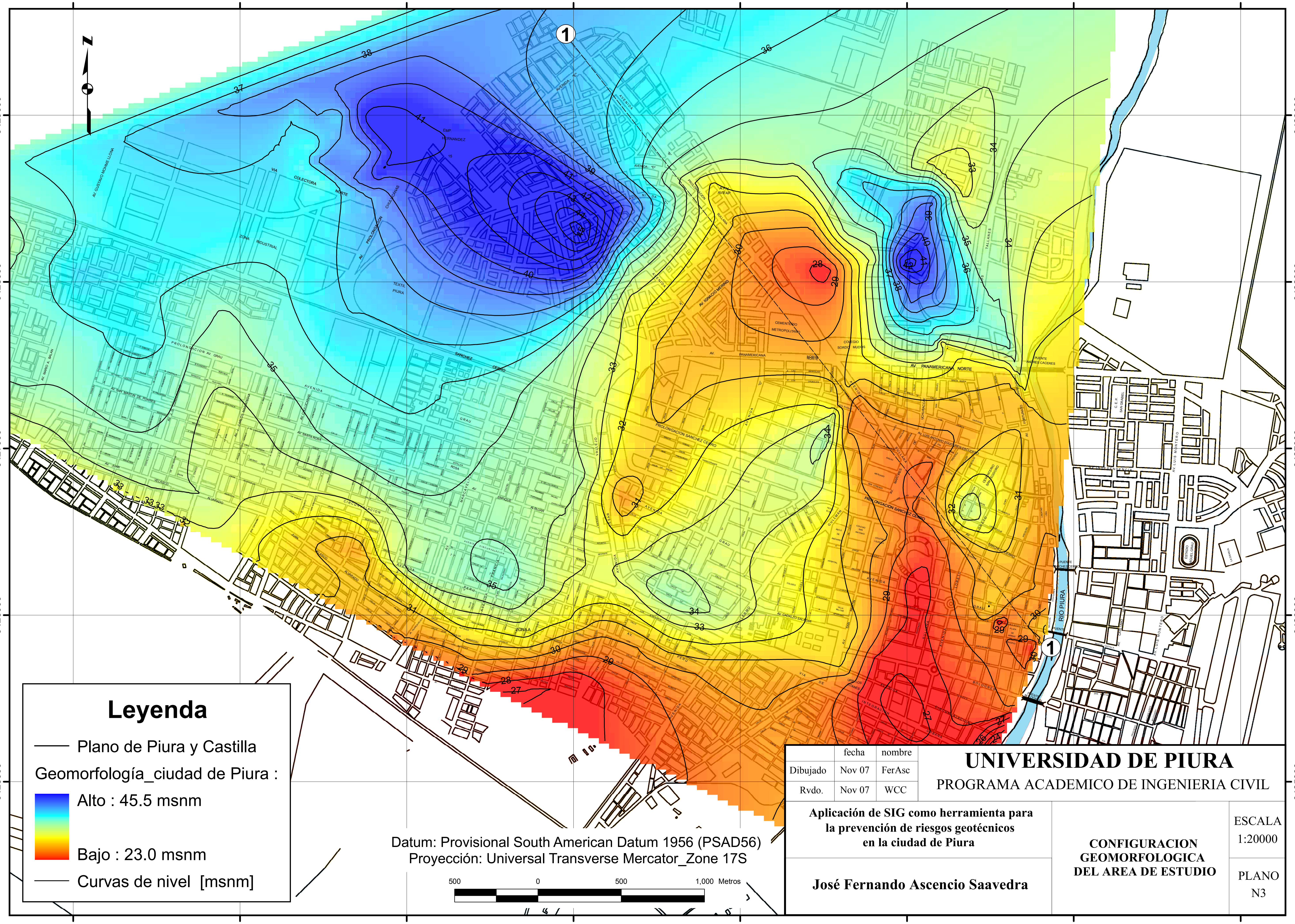
José Fernando Ascencio Saavedra

AREA DE ESTUDIO

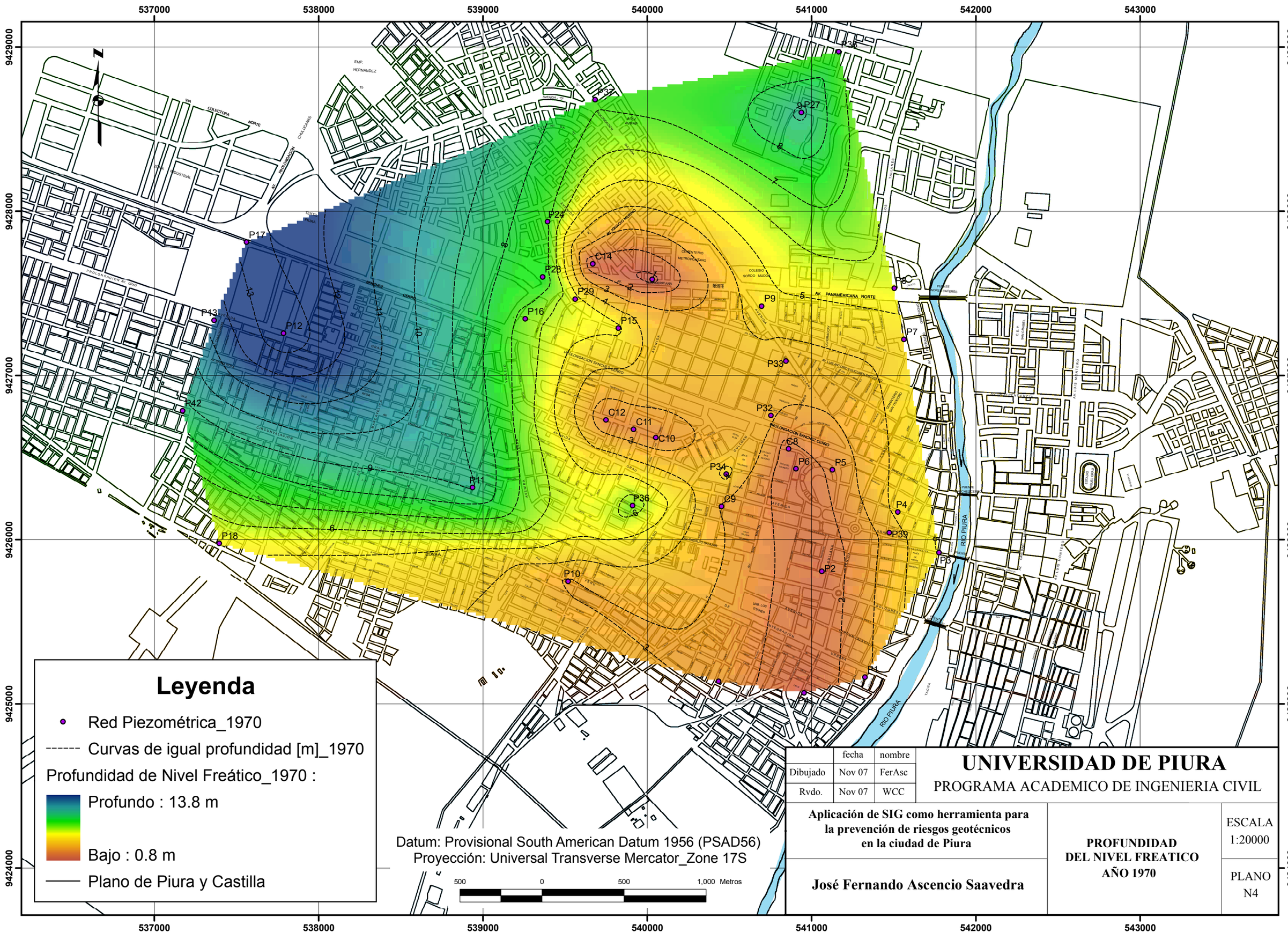
ESCALA

PLANO
N1


535000
536000
537000
538000
539000
540000
541000
542000
9429000
9428000
9427000
9426000
9425000
N
COLECTORA NORTE
GARITA DE CONTROL
AV. SANCHEZ CERRO(TAMBIEN CARRETERA PANAMERICANA)
AV. GUSTAVO MOHME LLONA
ZONA INDUSTRIAL
TEXTIL PIURA
EMP. HERNANDEZ
CEMENTERIO METROPOLITANO
COLEGIO SORDO MUDOS
AV. PANAMERICANA NORTE
PROLONGACION SANCHEZ CERRO
RIO PIURA
Leyenda
Estudios de Mecánica de Suelos_LEMC
Plano de Piura y Castilla
Datum: Provisional South American Datum 1956 (PSAD56)
Proyección: Universal Transverse Mercator_Zone 17S
500 0 500 1,000 Metros
UNIVERSIDAD DE PIURA
PROGRAMA ACADEMICO DE INGENIERIA CIVIL
fecha
nombre
Dibujado
Nov 07
FerAsc
Rvdo.
Nov 07
WCC
Aplicación de SIG como herramienta para la prevención de riesgos geotécnicos en la ciudad de Piura
José Fernando Ascencio Saavedra
UBICACION DE ESTUDIOS DE MECANICA DE SUELOS DEL LEMC - UDEP
ESCALA 1:20000
PLANO N2



Leyenda
Plano de Piura y Castilla
Geomorfología_ciudad de Piura :
Alto : 45.5 msnm
Bajo : 23.0 msnm
Curvas de nivel [msnm]
Datum: Provisional South American Datum 1956 (PSAD56)
Proyección: Universal Transverse Mercator_Zone 17S
500 0 500 1,000 Metros
fecha
nombre
Dibujado
Nov 07
FerAsc
Rvdo.
Nov 07
WCC
UNIVERSIDAD DE PIURA
PROGRAMA ACADEMICO DE INGENIERIA CIVIL
Aplicación de SIG como herramienta para la prevención de riesgos geotécnicos en la ciudad de Piura
José Fernando Ascencio Saavedra
CONFIGURACION GEOMORFOLOGICA DEL AREA DE ESTUDIO
ESCALA 1:20000
PLANO N3
536000
537000
538000
539000
540000
541000
542000
543000
9429000
9428000
9427000
9426000
9425000
RIO PIURA
AV. PANAMERICANA NORTE
PROLONGACION SANCHEZ CERRO



	fecha	nombre
Dibujado	Nov 07	FerAsc
Rvdo.	Nov 07	WCC

UNIVERSIDAD DE PIURA

PROGRAMA ACADEMICO DE INGENIERIA CIVIL

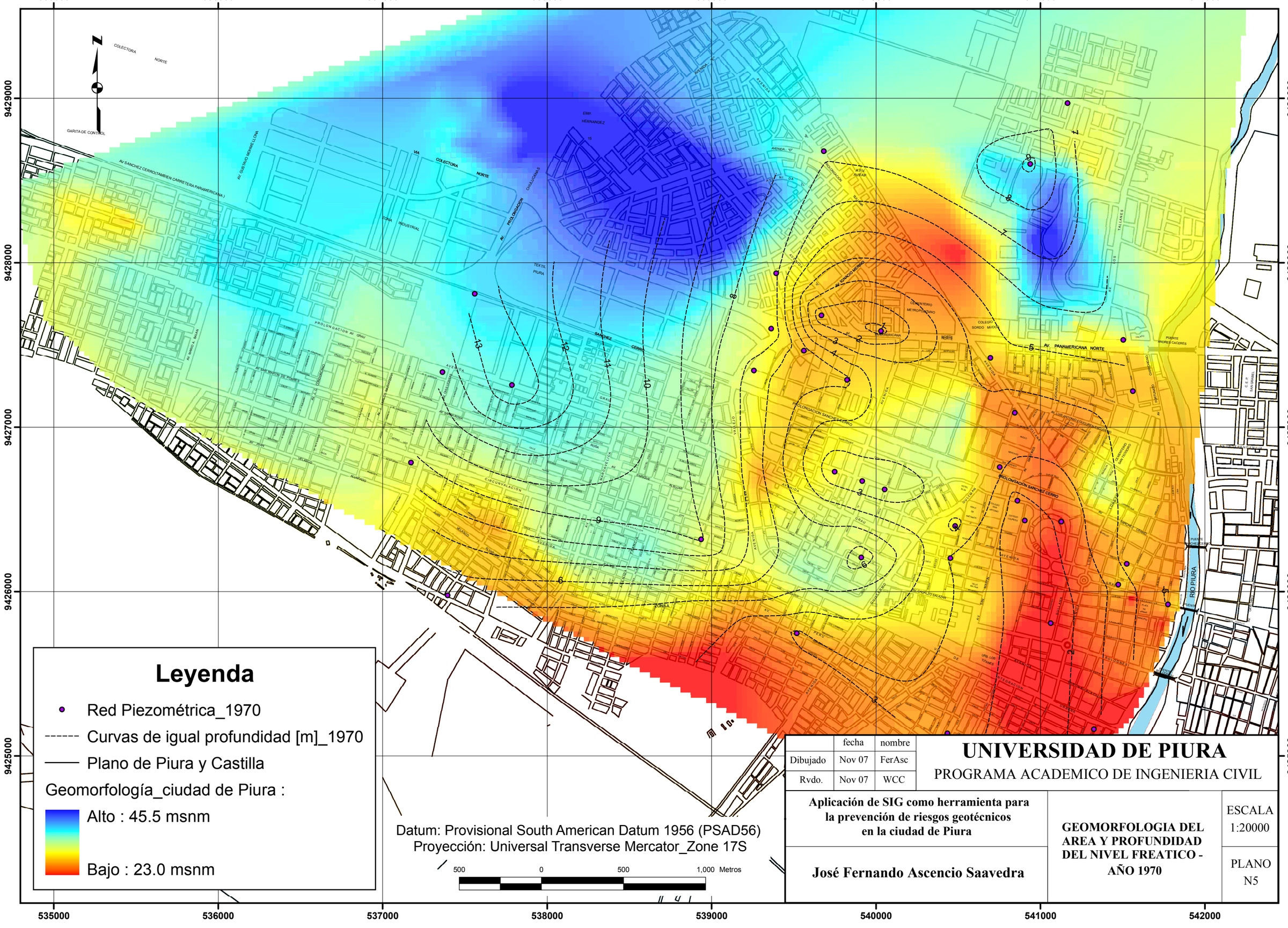
Aplicación de SIG como herramienta para la prevención de riesgos geotécnicos en la ciudad de Piura

José Fernando Ascencio Saavedra

PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREATICO AÑO 1970

ESCALA 1:20000

PLANO N4



	fecha	nombre
Dibujado	Nov 07	FerAsc
Rvdo.	Nov 07	WCC

UNIVERSIDAD DE PIURA

PROGRAMA ACADEMICO DE INGENIERIA CIVIL

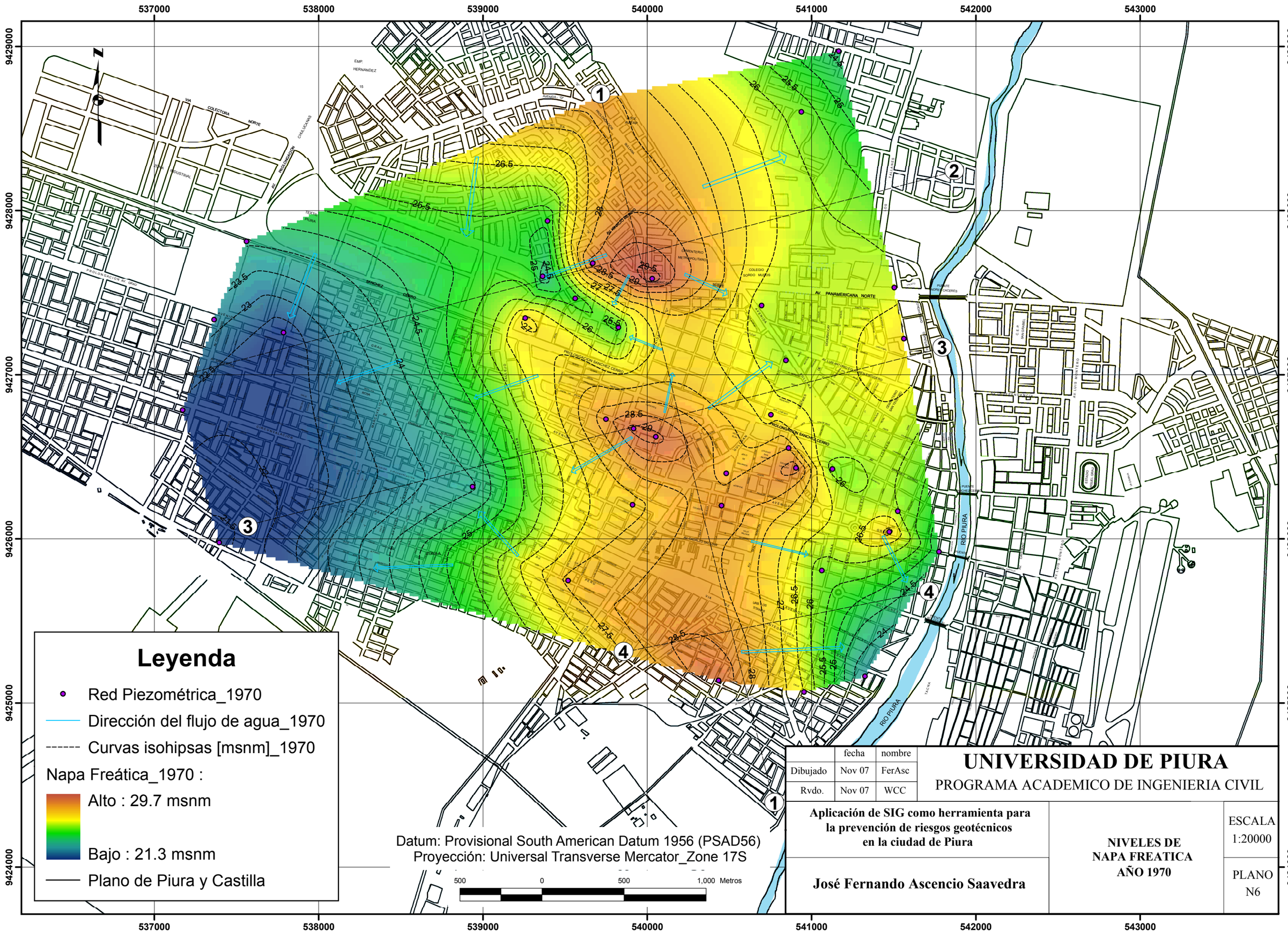
Aplicación de SIG como herramienta para la prevención de riesgos geotécnicos en la ciudad de Piura

José Fernando Ascencio Saavedra

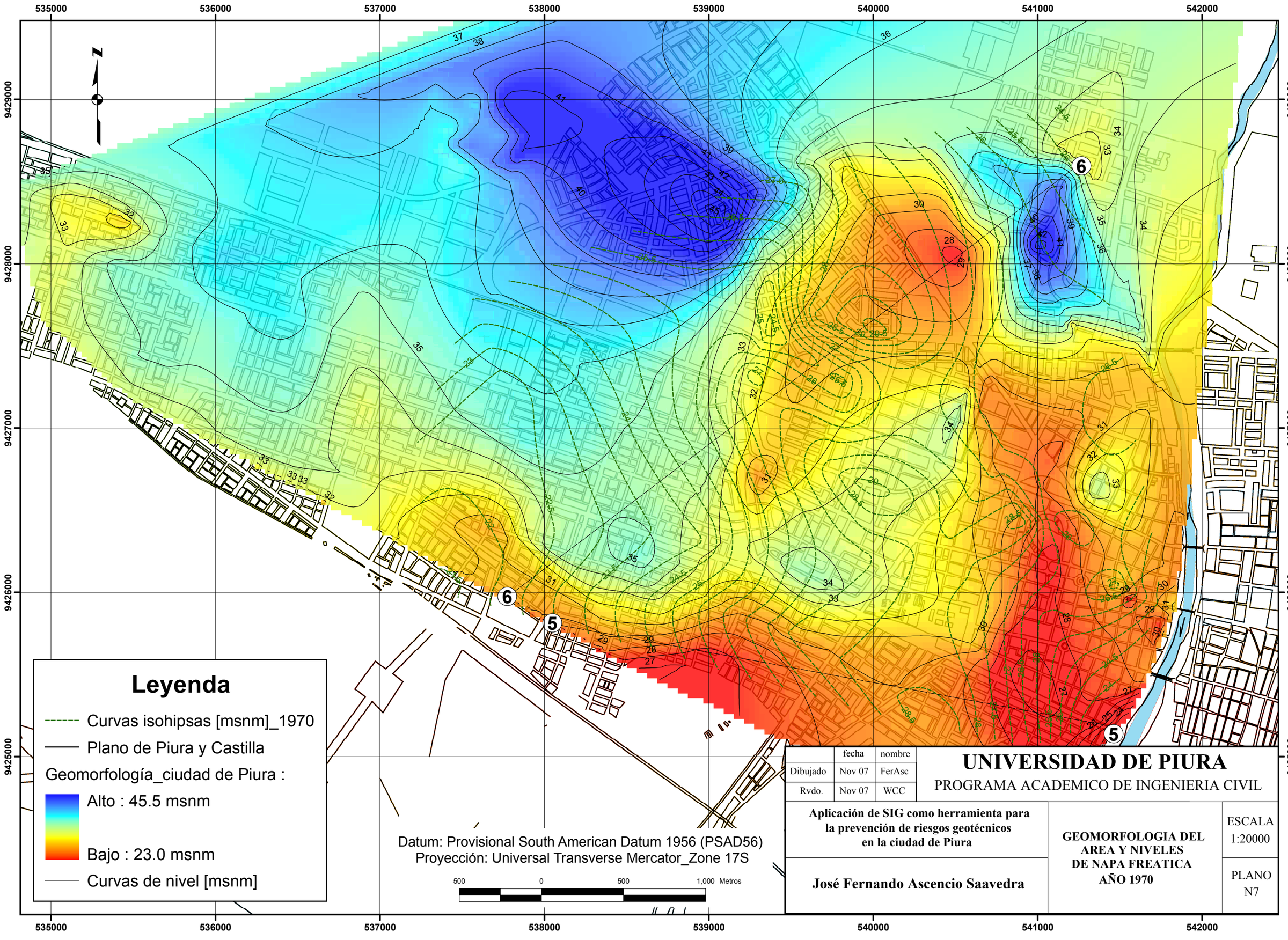
GEOMORFOLOGIA DEL AREA Y PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREATICO - AÑO 1970

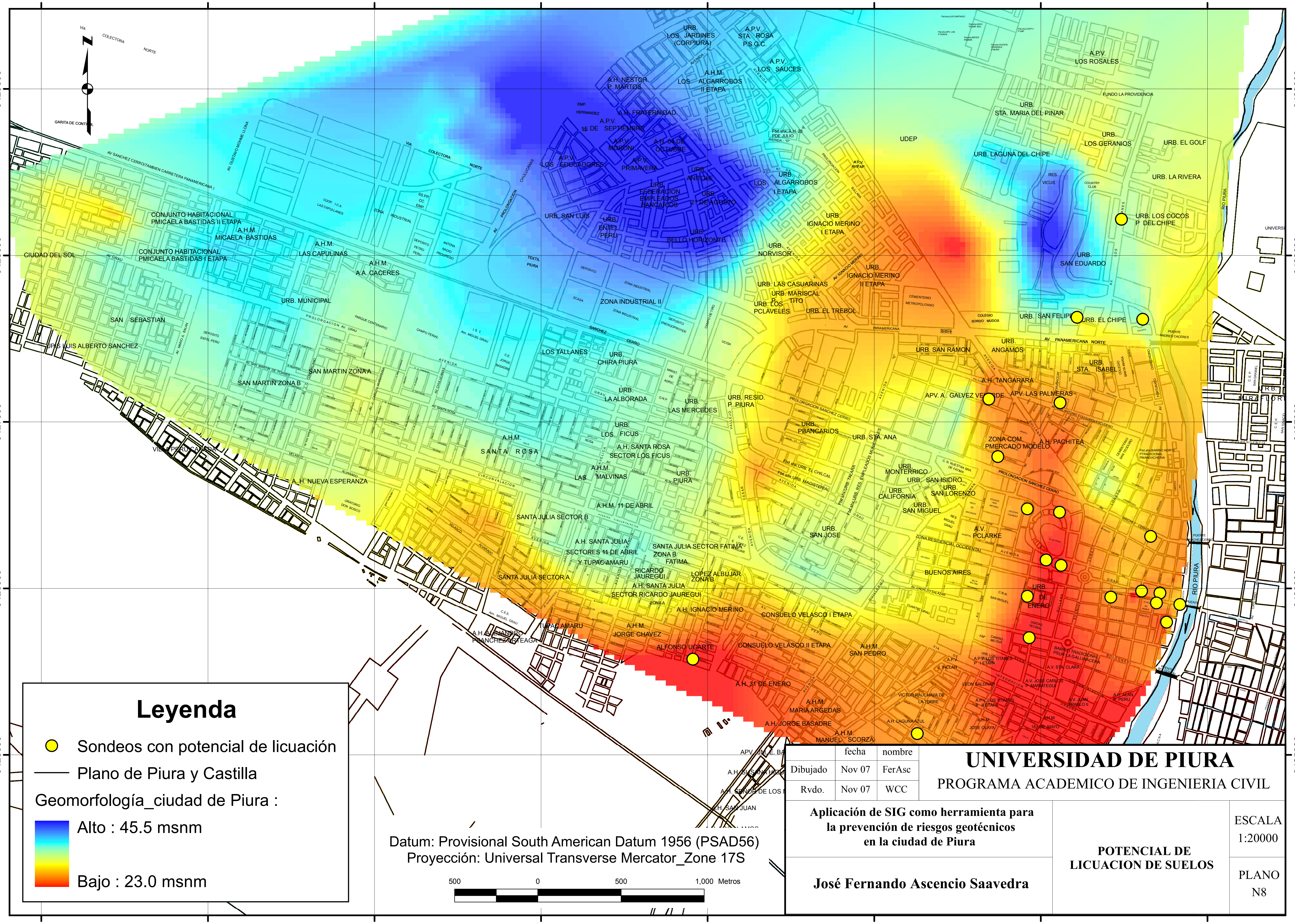
ESCALA 1:20000

PLANO N5



	fecha	nombre
Dibujado	Nov 07	FerAsc
Rvdo.	Nov 07	WCC


535000
536000
537000
538000
539000
540000
541000
542000
9429000
9428000
9427000
9426000
9425000
N
6
5
Leyenda
Curvas isohipsas [msnm]_1970
Plano de Piura y Castilla
Geomorfología_ciudad de Piura :
Alto : 45.5 msnm
Bajo : 23.0 msnm
Curvas de nivel [msnm]
Datum: Provisional South American Datum 1956 (PSAD56)
Proyección: Universal Transverse Mercator_Zone 17S
500 0 500 1,000 Metros
UNIVERSIDAD DE PIURA
PROGRAMA ACADEMICO DE INGENIERIA CIVIL
fecha nombre
Dibujado Nov 07 FerAsc
Rvdo. Nov 07 WCC
Aplicación de SIG como herramienta para la prevención de riesgos geotécnicos en la ciudad de Piura
José Fernando Ascencio Saavedra
GEOMORFOLOGIA DEL AREA Y NIVELES DE NAPA FREATICA AÑO 1970
ESCALA 1:20000
PLANO N7



	fecha	nombre
Dibujado	Nov 07	FerAsc
Rvdo.	Nov 07	WCC

UNIVERSIDAD DE PIURA

PROGRAMA ACADEMICO DE INGENIERIA CIVIL

Aplicación de SIG como herramienta para la prevención de riesgos geotécnicos en la ciudad de Piura

José Fernando Ascencio Saavedra

POTENCIAL DE LICUACION DE SUELOS

ESCALA 1:20000

PLANO N8

Anexo B

Tablas

Leyenda

La siguiente leyenda describe los datos de ingreso para ser analizados por el programa Licua.

2004_09A_SPT1 Fila 1

5 10 1.6 Fila 2

1	5	3	SP
2	6	3	SP
3	8	3	SP
4	16	3	SP
5	24	3	SP
a	B	c	d

Fila 1:	Código de informe (2004_09A) y a que sondeo se realizó análisis (SPT1)	
Fila 2:	Número izquierdo (5)	Número de profundidades exploradas
	Número central (10)	Profundidad del Nivel Freático
	Número derecho (1.6)	Peso Unitario
Columna "a"	Profundidad	
Columna "b"	Número de golpes N del SPT	
Columna "c"	Contenido de finos	
Columna "d"	Tipo de suelo	

Donde:

Profundidad	[m]
Peso Unitario	[Tn/m3]
Contenido de finos	%
Número de golpes	Adimensional
Tipo de suelo	Clasificación SUCS

Tabla B-1.- Datos de ingreso requeridos por el programa Licua. Niveles Freáticos del SPT (Ver leyenda)

```
1998_01_SPT1
 9  6.25   1.6
 4   11    19    SM
 5   13    19    SM
 6   18    19    SM
 7    9    59    ML
 8    8    42    SM
 9    8    42    SM
10   41    61    CL
11   48    61    CL
12   66    66    ML

1998_02_SPT1
 7  7.1    1.6
 6   24    22    SM
 7   11    55    SM
 8   21    60    ML
 9   32    88    CH
10   50    88    CH
11   44    60    ML
12   50     7    SP/SM


1998_03_SPT1
12  0.15   1.6
 1   18    78    CL
 2   23    19    SM
 3   34    19    SM
 4   67     4    SP
 5   67     4    SP
 6   55    16    SM
 7   50    16    SM
 8   50    10    SP/SM
 9   55    10    SP/SM
10   37    10    SP/SM
11   39    10    SP/SM
12   43     3    SP

1999_09_SPT1
 7  1.6    1.6
0.5  11    1.1   SP
1.1  13    1.1   SP
 2   14    1.1   SP
 3   22    1.1   SP
 4   22    1.1   SP
 5   24    1.1   SP
 6   50    1.1   SP

2001_10_SPT1
 4   10    1.8
 1   14    28    SM
 2   37    20    SM
 3   45    81    cH
 4   46    28    SM

2001_12_SPT2
 5  4.38   1.8
 1    2    64    CL
 2    3    46    CL
 3    7    89    cL
 4   11     4    SP
 5   25     4    SP


2002_11_SPT2
 4  1.61   1.8
 2    6     9    SP/SM
 3    6     9    SP/SM
 4    9     9    SP/SM
 5   11     9    SP/SM

2003_06_SPT1
 4   10    1.7
 2   36     9    SP/SM
 3   43     9    SP/SM
 4   43     9    SP/SM
 5   46    30    SM

2004_01_SPT4
 4  5.05   1.8
 3    2     9    SP/SM
 4   24     9    SP/SM
 5   37     9    SP/SM
 6   85     9    SP/SM

2004_02_SPT2
 5   10    1.8
 1    2    13    SM
 2    5    13    SM
 3   11    13    SM
 4   22    13    SM
 5   59    13    SM

2004_03_SPT1
 4  3.5    1.8
 1   10     5    SP
 2    5    86    CH
 3   20    46    SC
 4   40    86    CH

2004_09_SPT1
 5   10    1.6
 1    5     3    SP
 2    6     3    SP
 3    8     3    SP
 4   16     3    SP
 5   24     3    SP

2004_09A_SPT1
 4   10    1.6
 1    9     3    SP
 2    7     3    SP
 3   10     3    SP
 4    7     3    SP

2005_07_SPT1
 6   10    1.6
 1    6    11    SP/SM
 2   14    27    SM
 3   18    74    CL/ML
 4   14    14    SM
 5   30    14    SM
 6   39    27    SM


2005_11_SPT2
 5   10    1.6
 1    2     3    SP
 2   10     3    Sp
 3   20     3    SP
 4   29     3    SP
 5   50     6    SP/SM

2006_401_SPT1
 7   10    1.6
 1    9     5    SP
 2   11     5    Sp
 3   13     5    SP
 4   17     5    SP
 5   18    23    SM
 6   23    23    SM
 7   25    23    SM

2006_405_SPT2
12  4.8    1.6
 1    3    14    SP/SM
 2    7     6    SP/SM
 3   24    49    SC
 4   22    49    SC
5.3  50    14    SP/SM
6.1  50    14    SP/SM
7.3  50    44    SC
8.3  34    44    SC
9.5  43    44    SC
10.3 55    44    SC
11.5 34    73    CL
12   54    73    CL

2006_406_SPT3
 7   10    1.6
 1    5     3    SP
 2    6     3    SP
 3   17     3    SP
 4   28     3    SP
 5   29     3    SP
 6   40     3    SP
 7   49     3    SP

2006_413_SPT1
10  2.7    1.7
 1    8     8    SP/SM
 2    3     8    SP/SM
 3    4     8    SP/SM
 4    7     8    SP/SM
 5   11     8    SP/SM
 6   12     8    SP/SM
 7    7     8    SP/SM
 8    7     4    SP
 9   19     4    SP
10   13     4    SP
```

Tabla B-1.- Datos requeridos por el programa Licua. Niveles Freáticos elevados
(Ver leyenda)

87_25_S1
5 0 1.6
1 18 10 SP
2 24 10 SP
3 30 10 SP
4 39 10 SP
5 44 10 SP

87_37_SPT4
3 2 1.57
1 15 9 SP
2 22 9 SP
3 23 9 SP

93_04_SPT1
5 2.4 1.7
1.45 12 5 SP
2.4 17 5 SP
3.3 26 5 SP
4.3 47 5 SP
5.35 62 5 SP/SM

94_22_SPT2
6 0 1.7
0.80 8 25.9 SP
1.55 14 25.9 SP
2.30 14 25.9 SP
3.05 23 25.9 SP
3.80 21 25.9 SP
4.55 22 25.9 SP

95_23_SPT1
5 2.4 1.7
1.3 4 3.67 SP
2.3 4 3.67 SP
3.3 29 3.67 SP
4.3 24 3.67 SP
5.3 30 3.67 SP

99_01_SPT3
7 3.25 1.7 SP
1 14 0.62 SP
2 18 0.62 SP
3 16 0.62 SP
4 25 0.62 SP
5 24 0.62 SP
6 57 8.16 SP/SM
7 68 8.16 SP/SM

2001_12_SPT2
5 0.75 1.8
1 2 64 CL
2 3 46 CL
3 7 89 cL
4 11 4 SP
5 25 4 SP

2004_01_SPT4
4 1.50 1.8
3 2 9 SP/SM
4 24 9 SP/SM
5 37 9 SP/SM
6 85 9 SP/SM

2004_02_SPT2
5 2 1.8
1 2 13 SM
2 5 13 SM
3 11 13 SM
4 22 13 SM
5 59 13 SM

2004_09A_SPT1
4 4 1.6
1 9 3 SP
2 7 3 SP
3 10 3 SP
4 7 3 SP

2005_11_SPT2
5 3 1.6
1 2 3 SP
2 10 3 Sp
3 20 3 SP
4 29 3 SP
5 50 6 SP/SM

Tabla B-2.- Relación de resultados obtenidos mediante Licua. Aceleración 0.4g y profundidad del nivel freático al año de realizado el estudio

1998_01_SPT1
P. Unit.= 1.6000
Prof. Nivel Freatico = 6.2500

Prof. m	P. Tot. kg/cm2	P. Efc. kg/cm2	rd	Demanda -1-	N	Cn	N1	Capac. -2-	F.S. -2/1-
4.0000	.6400	.6400	.9400	.2444	11.0000	1.2500	13.0000	.1748	.7153
5.0000	.8000	.8000	.9250	.2405	13.0000	1.1180	14.0000	.1925	.8004
6.0000	.9600	.9600	.9100	.2366	18.0000	1.0206	18.0000	.2855	1.2066
7.0000	1.1200	1.0450	.8950	.2494	9.0000	.9782	8.0000	.1347	.5401
8.0000	1.2800	1.1050	.8800	.2650	8.0000	.9513	7.0000	.1250	.4717
9.0000	1.4400	1.1650	.8650	.2780	8.0000	.9265	7.0000	.1250	.4497
10.0000	1.6000	1.2250	.8500	.2887	41.0000	.9035	37.0000	1.3852	4.7988
11.0000	1.7600	1.2850	.8350	.2974	48.0000	.8822	42.0000	1.5000	5.0445
12.0000	1.9200	1.3450	.8200	.3043	66.0000	.8623	56.0000	1.5000	4.9286

2002_11_SPT2
P. Unit.= 1.8000
Prof. Nivel Freatico = 1.6100

Prof. m	P. Tot. kg/cm2	P. Efc. kg/cm2	rd	Demanda -1-	N	Cn	N1	Capac. -2-	F.S. -2/1-
2.0000	.3600	.3210	.9700	.2828	6.0000	1.7650	10.0000	.1166	.4122
3.0000	.5400	.4010	.9550	.3344	6.0000	1.5792	9.0000	.1136	.3397
4.0000	.7200	.4810	.9400	.3658	9.0000	1.4419	12.0000	.1284	.3510
5.0000	.9000	.5610	.9250	.3858	11.0000	1.3351	14.0000	.1480	.3836

2006_413_SPT
P. Unit.= 1.7000
Prof. Nivel Freatico = 2.7000

Prof. m	P. Tot. kg/cm2	P. Efc. kg/cm2	rd	Demanda -1-	N	Cn	N1	Capac. -2-	F.S. -2/1-
1.0000	.1700	.1700	.9850	.2561	8.0000	2.4254	19.0000	.2203	.8600
2.0000	.3400	.3400	.9700	.2522	3.0000	1.7150	5.0000	.1222	.4846
3.0000	.5100	.4800	.9550	.2638	4.0000	1.4434	5.0000	.1222	.4632
4.0000	.6800	.5500	.9400	.3022	7.0000	1.3484	9.0000	.1123	.3716
5.0000	.8500	.6200	.9250	.3297	11.0000	1.2700	13.0000	.1327	.4025
6.0000	1.0200	.6900	.9100	.3498	12.0000	1.2039	14.0000	.1426	.4076
7.0000	1.1900	.7600	.8950	.3644	7.0000	1.1471	8.0000	.1119	.3072
8.0000	1.3600	.8300	.8800	.3749	7.0000	1.0976	7.0000	.1135	.3028
9.0000	1.5300	.9000	.8650	.3823	19.0000	1.0541	20.0000	.2055	.5374
10.0000	1.7000	.9700	.8500	.3873	13.0000	1.0153	13.0000	.1191	.3076

Tabla B-2.- Relación de resultados obtenidos mediante Licua. Aceleración 0.4g y nivel freático elevado

2001_12_SPT2
P. Unit.= 1.8000
Prof. Nivel Freatico = .7500

Prof. m	P. Tot. kg/cm2	P. Efc. kg/cm2	rd	Demanda -1-	N	Cn	N1	Capac. -2-	F.S. -2/1-
1.0000	.1800	.1550	.9850	.2974	2.0000	2.5400	5.0000	.1123	.3777
2.0000	.3600	.2350	.9700	.3863	3.0000	2.0628	6.0000	.1176	.3043
3.0000	.5400	.3150	.9550	.4257	7.0000	1.7817	12.0000	.1957	.4598
4.0000	.7200	.3950	.9400	.4455	11.0000	1.5911	17.0000	.1579	.3545
5.0000	.9000	.4750	.9250	.4557	25.0000	1.4510	36.0000	.7255	1.5921

2004_01_SPT4
P. Unit.= 1.8000
Prof. Nivel Freatico = 1.5000

Prof. m	P. Tot. kg/cm2	P. Efc. kg/cm2	rd	Demanda -1-	N	Cn	N1	Capac. -2-	F.S. -2/1-
3.0000	.5400	.3900	.9550	.3438	2.0000	1.6013	3.0000	.1365	.3969
4.0000	.7200	.4700	.9400	.3744	24.0000	1.4586	35.0000	.8235	2.1994
5.0000	.9000	.5500	.9250	.3935	37.0000	1.3484	49.0000	1.5000	3.8115
6.0000	1.0800	.6300	.9100	.4056	85.0000	1.2599	107.0000	1.5000	3.6982

2004_02_SPT2
P. Unit.= 1.8000
Prof. Nivel Freatico = 2.0000

Prof. m	P. Tot. kg/cm2	P. Efc. kg/cm2	rd	Demanda -1-	N	Cn	N1	Capac. -2-	F.S. -2/1-
1.0000	.1800	.1800	.9850	.2561	2.0000	2.3570	4.0000	.1212	.4732
2.0000	.3600	.3600	.9700	.2522	5.0000	1.6667	8.0000	.1150	.4560
3.0000	.5400	.4400	.9550	.3047	11.0000	1.5076	16.0000	.2052	.6733
4.0000	.7200	.5200	.9400	.3384	22.0000	1.3868	30.0000	.6918	2.0444
5.0000	.9000	.6000	.9250	.3608	59.0000	1.2910	76.0000	1.5000	4.1580

2004_09A_SPT
P. Unit.= 1.6000
Prof. Nivel Freatico = 4.0000

Prof. m	P. Tot. kg/cm2	P. Efc. kg/cm2	rd	Demanda -1-	N	Cn	N1	Capac. -2-	F.S. -2/1-
1.0000	.1600	.1600	.9850	.2561	9.0000	2.5000	22.0000	.2459	.9603
2.0000	.3200	.3200	.9700	.2522	7.0000	1.7678	12.0000	.1138	.4513
3.0000	.4800	.4800	.9550	.2483	10.0000	1.4434	14.0000	.1262	.5083
4.0000	.6400	.6400	.9400	.2444	7.0000	1.2500	8.0000	.1101	.4504

Tabla B-3.- Relación de estudios con ausencia de planos de referencia

COD	INFORME	DESCRIPCIÓN
87_26	Registros Públicos	Puntos ubicados con la ayuda de fotografías
88_05	Centro cultural Puihrá	Ubicado en vereda, parte posterior de la casa (malecón)
91_06	ISP Almirante Miguel Grau	Ubicado al centro del patio principal
99_11	Molino Piura	Ubicado según referencias escritas en el informe
92_15	Iglesia Los Algarrobos.	Ubicados en una diagonal Noroeste-Sureste
92_16	Urb. La Laguna El Chipe	Ubicado en el centro del área del terreno
94_02	Tanque elevado	Ubicado sobre el actual tanque elevado
97_01	Terminal terrestre	Puntos ubicados teniendo como referencia el informe del diseño de pavimento flexible del mismo terminal terrestre código 97_01
99_12	IST Almirante Miguel Grau	Ubicado arbitrariamente dentro de las instalaciones del Instituto
2003_06	Centro comercial	Puntos colocados con la ayuda de fotografías
2004_01	Centro comercial SagaFalabella	Puntos colocados con la ayuda de fotografías
2004_02	Centro comercial	Puntos colocados con la ayuda de fotografías
2004_9A	Edificio de departamentos	Punto ubicados arbitrariamente dentro del terreno

Anexo C

Recopilación de resultados obtenidos. Tesis del Ing. César Pinto

Tabla C-1.- Resultados obtenidos. Tesis de 1999

Sondeos	Aceleración Máxima Superficial para M=7.5		Variación Nivel Freático	Distrito
	a=0.24g	a=0.4g	a=0.24g	
S1	Sí	Sí	Sí	Piura
S2	No	No	No	Piura
S3	No	No	No	Piura
S4	No	No	No	Piura
S5	No	No	No	Piura
S6	Sí	Sí	Sí	Piura
S7	No	No	No	Piura
S8	No	No	No	Piura
S9	No	No	No	Castilla
S10	No	No	No	Piura
S11	No	Sí	Sí	Piura
S12	Sí	Sí	Sí	Piura
S13	No	No	No	Piura
S14	No	No	No	Piura
S15	No	No	No	Piura
S16	No	No	No	Piura
S17	Sí	Sí	Sí	Piura
S18	No	No	No	Piura
S19	Sí	Sí	Sí	Piura
S20	No	No	No	Piura
S21	No	No	No	Piura
S22	No	No	No	Piura
S23	No	Sí	No	Piura
S24	No	No	No	Piura
S25	No	No	No	Piura
S26	No	No	No	Piura
S27	No	No	Sí	Piura
S28	No	Sí	Sí	Piura
S29	No	No	No	Piura
S30	No	Sí	No	Castilla
S31	No	No	No	Piura
S32	No	No	No	Castilla
S33	Sí	Sí	Sí	Piura
S34	No	No	No	Castilla
S35	No	No	No	Piura
S36	No	No	No	Piura
S37	No	No	No	Piura
S38	No	No	No	Piura
S39	No	No	No	Piura
S40	Sí	Sí	Sí	Castilla
S41	Sí	Sí	Sí	Castilla
S42	Sí	Sí	Sí	Piura
S43	No	No	No	Castilla
S44	No	No	No	Piura
S45	No	No	No	Castilla

Continuación

Sondeos	Aceleración Máxima Superficial para M=7.5		Variación Nivel Freático	Distrito
	a=0.24g	a=0.4g	a=0.24g	
S46	No	No	No	Piura
S47	No	No	No	Piura
S48	No	No	No	Castilla
S49	No	No	No	Piura
S50	Sí	Sí	Sí	Castilla
S51	No	No	No	Piura
S52	No	No	No	Castilla
S53	Sí	Sí	Sí	Piura
S54	No	No	No	Castilla
S55	No	No	No	Piura
S56	No	No	Sí	Piura
S57	No	No	No	Piura
S58	No	No	No	Piura
S59	No	No	No	Piura
S60	No	No	No	Piura
S61	No	No	No	Piura
S62	No	No	No	Castilla
S63	No	No	No	Piura
S64	No	No	No	Piura
S65	No	No	No	Piura
S66	No	No	No	Piura
S67	No	No	No	Piura
S68	No	No	No	Piura
S69	No	No	No	Piura
S70	No	No	No	Piura
S71	Sí	Sí	Sí	Piura
S72	No	No	No	Piura
S73	Sí	Sí	Sí	Piura
S74	No	No	No	Piura
S75	Sí	Sí	Sí	Castilla

donde:
“Sí” representa la susceptibilidad de licuar
“No” representa la no es susceptibilidad de licuar