



UNIVERSIDAD RICARDO PALMA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

Soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables para mejorar el comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR(ES)

Hinojosa Palomino, Leonel Alexander

ORCID: 0009-0001-2689-9259

Choque Rivas, Luis Miguel

ORCID: 0009-0006-8363-2485

ASESOR

Torres Chung, Cesar Roberto

ORCID: 0000-0002-3212-2817

Lima, Perú

2023

METADATOS COMPLEMENTARIOS

Datos del autor(es)

Choque Rivas, Luis Miguel

DNI: 74807337

Hinojosa Palomino, Leonel Alexander

DNI: 78019654

Datos de asesor

Torres Chung, Cesar Roberto

DNI: 41182279

Datos del jurado

JURADO 1

Pereyra Salardi, Enriqueta

DNI: 06743824

ORCID: 0000-0003-2527-3665

JURADO 2

Chavarry Vallejos, Carlos Magno

DNI: 07410234

ORCID: 0000-0003-0512-8954

JURADO 3

Chavarría Reyes, Liliana Janet

DNI: 25481792

ORCID: 0000-0002-1759-2132

Datos de la investigación

Campo del conocimiento OCDE: 2.01.01

Código del Programa: 732016

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Nosotros, Leonel Alexander Hinojosa Palomino, con código de estudiante N°201621237, con DNI N°78019654, con domicilio en Jr. combate de Angamos 123, distrito Santiago de Surco, provincia y departamento de Lima, y Luis Miguel Choque Rivas, con código de estudiante N°201720436, con DNI N°74807337, con domicilio en Av. 24 de junio mzh1 lote 10 -A, distrito Chorrillos, provincia y departamento de Lima, en nuestra condición de bachilleres en Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería, declaramos bajo juramento que:

La presente tesis titulada: “Soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables para mejorar el comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales” es de nuestra única autoría, bajo el asesoramiento del docente Mg. Ing. César Roberto Torres Chung, y no existe plagio y/o copia de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación presentado por cualquier persona natural o jurídica ante cualquier institución académica o de investigación, universidad, etc; la cual ha sido sometida al antiplagio Turnitin y tiene el 19% de similitud final.

Dejamos constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en la tesis, el contenido de estas corresponde a las opiniones de ellos, y por las cuales no asumo responsabilidad, ya sean de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o de internet.

Asimismo, ratificamos plenamente que el contenido íntegro de la tesis es de nuestro conocimiento y autoría. Por tal motivo, asumimos toda la responsabilidad de cualquier error u omisión en la tesis y somos conscientes de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de falsa declaración, nos sometemos a lo dispuesto en las normas de la Universidad Ricardo Palma y a los dispositivos legales nacionales vigentes.

Surco, 24 de octubre de 2023



Leonel Alexander Hinojosa Palomino
DNI N°78019654



Luis Miguel Choque Rivas
DNI N°74807337

INFORME DE ORIGINALIDAD TURNITIN

Soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables para mejorar el comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales

INFORME DE ORIGINALIDAD

19% INDICE DE SIMILITUD	18% FUENTES DE INTERNET	3% PUBLICACIONES	7% TRABAJOS DEL ESTUDIANTE
-----------------------------------	-----------------------------------	----------------------------	--------------------------------------

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	4%
2	repositorio.urp.edu.pe Fuente de Internet	4%
3	Submitted to Universidad Ricardo Palma Trabajo del estudiante	2%
4	ninive.ismm.edu.cu Fuente de Internet	1%
5	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	1%
7	qdoc.tips Fuente de Internet	<1%
8	Submitted to Universidad Pontificia Bolivariana Trabajo del estudiante	<1%


Dra. Vargas Chang Esther Joni

DEDICATORIA

A mi padre y madre.

Hinojosa Palomino, Leonel Alexander

A mi padre y a mi madre por todo el esfuerzo que hacen siempre.

Choque Rivas, Luis Miguel

AGRADECIMIENTO

A mi padre, que fue mi mentor. Y mi madre, que siempre estuvo acompañándome y preocupándose por mí.

Hinojosa Palomino, Leonel Alexander

A mi padre Cesar Luis Choque Bolívar y a mi madre Jannet Rivas Martínez por siempre ser mi imagen a seguir, pero sobre todo por ser mi aliento a lo largo de toda mi vida.

Choque Rivas, Luis Miguel

ÍNDICE GENERAL

METADATOS COMPLEMENTARIOS	ii
DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD.....	iii
INFORME DE ORIGINALIDAD TURNITIN	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE FÓRMULAS.....	xv
RESUMEN	xvii
ABSTRACT.....	xviii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO Y DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.1 Descripción de la realidad problemática.....	2
1.1.1 Problema e importancia	2
1.1.2 Árbol del problema (Causas – Problema - Consecuencias).....	3
1.2 Formulación del problema	4
1.2.1 Problema general	4
1.2.2 Problemas específicos.....	4
1.3 Objetivo general y específico	4
1.3.1 Objetivo general.....	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Delimitación de la investigación.....	4
1.4.1 Delimitación geográfica.....	4
1.4.2 Delimitación temporal	4
1.4.3 Delimitación de la temática	5
1.4.4 Delimitación muestral.....	5
1.5 Justificación de la investigación	5

1.5.1 Conveniencia	5
1.5.2 Relevancia social	5
1.5.3 Aplicaciones prácticas.....	5
1.5.4 Utilidad metodológica.....	5
1.5.5 Valor teórico.....	5
1.6 Importancia del estudio.....	6
1.6.1 Nuevos conocimientos.....	6
1.6.2 Aporte.....	6
1.7 Limitaciones del estudio	6
1.7.1 Falta de estudios previos de investigación.....	6
1.7.2 Metodológicos o prácticos	6
1.7.3 Medidas para la recolección de los datos.....	6
1.7.4 Obstáculos en la investigación.....	6
1.8 Alcance.....	6
1.9 Viabilidad del estudio	7
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	8
2.1 Marco histórico	8
2.2 Antecedentes del estudio de investigación.....	9
2.2.1 Antecedentes internacionales	9
2.2.2 Antecedentes nacionales	10
2.2.3 Artículos relacionados con el tema	11
2.3 Estructura teórica y científica que sustenta el estudio	13
2.3.1 Factor de licuefacción del suelo.....	13
2.3.2 Suelos potencialmente licuables	17
2.3.3 Capacidad portante del suelo en condición estática.....	17
2.3.4 Capacidad portante del suelo en condición dinámica.....	20
2.3.5 Soluciones geotécnicas	24
2.3.6 Columnas de grava.....	24
2.3.7 Inyección de estabilizadores químicos	26
2.3.8 Presión de poros en suelos	26
2.3.9 Cimentaciones superficiales	27
2.3.10 Norma E050.....	27
2.4 Definición de términos básicos.....	27
2.5 Fundamentos teóricos que sustentan las hipótesis.....	28

CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS	40
3.1 Hipótesis	40
3.1.1 Hipótesis general.....	40
3.1.2 Hipótesis específicas.....	40
3.2 Variables	40
3.2.1 Definición conceptual y operacional	40
3.2.2 Operacionalización de las variables.....	41
CAPÍTULO IV: MARCO METODOLÓGICO	42
4.1 Método de la investigación	42
4.1.1 Método	42
4.1.2 Orientación.....	42
4.1.3 Enfoque.....	42
4.1.4 Instrumento de recolección de datos.....	42
4.2 Tipo de investigación	42
4.3 Nivel de la investigación.....	43
4.4 Diseño de la investigación	43
4.5 Población y muestra.....	43
4.5.1 Población	43
4.5.2 Muestra	43
4.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	43
4.6.1 Instrumentos de recolección de datos	43
4.6.2 Métodos y técnicas.....	44
4.7 Descripción de la recolección de datos	44
CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	45
5.1 Licuefacción del Suelo (Sin solución geotécnica).....	45
Parámetros iniciales para los cálculos respectivos, según EMS.	45
5.2 Capacidad portante estática (Sin solución geotécnica).....	48
5.3 Capacidad portante dinámica (Sin solución geotécnica)	50
5.4 Implementando solución geotécnica: Columna de grava	51
5.5 Implementando solución geotécnica: Inyección de estabilizadores químicos.....	53
5.6 Licuefacción del Suelo (Columna de Grava).....	57
5.7 Capacidad Portante Estática (Columna de Grava).....	60
5.8 Capacidad Portante Dinámica (Columna de Grava).....	61

5.9 Licuefacción del Suelo (Inyección de Estabilizadores)	63
5.10 Capacidad Portante Estática (Inyección de Estabilizadores)	66
5.11 Capacidad Portante Dinámica (Inyección de Estabilizadores)	67
CAPÍTULO VI: CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS	70
6.1 Contrastación de la hipótesis general.....	70
6.2 Contrastación de las hipótesis específicas	84
CONCLUSIONES	85
RECOMENDACIONES.....	86
REFERENCIAS.....	87
ANEXOS	91
ANEXO A: Operacionalización de variables	91
ANEXO B: Matriz de Consistencia.....	92
ANEXO C: “Servicio de consultoría para la supervisión del servicio de ingeniería, suministro y construcción de tanques para almacenamiento de Diesel en refinería Talara”	93
ANEXO D: Autorización para utilizar datos en investigación académica	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Factores de Corrección Para el Ensayo SPT	15
Tabla 2	Factores de Corrección por influencia de la Magnitud del Sismo	16
Tabla 3	Factores de Capacidad de Carga	23
Tabla 4	Potencial de Licuefacción sin Columna de Grava: Metodología Seed & Idriss (Falla Rufasto, 2021, Anexo 8.4)	29
Tabla 5	Cuadro de Potencial de Licuefacción Después de la Aplicación de las Columnas de Grava (Falla Rufasto, 2021, Anexo 8.5)	30
Tabla 6	Resistencia Dinámica de los Suelos Mejorados, Prueba SPT 17	32
Tabla 7	Evaluación del Índice Potencial de Daños Inducidos en la Superficie del Perfil de Terreno Mejorado, Pruebas SPT (12,13) (Fernández Silva & Vásquez Diaz, 2022, p. 248)	33
Tabla 8	Mejora de las Propiedades del Suelo Arcilloso con la Adición de Relaves y Yeso	39
Tabla 9	Valores Ncampo del Ensayo SPT	46
Tabla 10	Cálculo de los Valores N70 y N60	47
Tabla 11	Cálculo de la Relación de Esfuerzos Cíclicos ($t_l/\sigma'v$) y Relación de Esfuerzos de Corte Debido al Sismo ($t_d/\sigma'v$)	48
Tabla 12	Cálculo del Factor de Licuefacción	48
Tabla 13	Datos Iniciales para el Diseño de Columnas de Gravas	52
Tabla 14	N mejorados por Diseño de Columnas de Gravas.....	52
Tabla 15	Ajuste Lineal de los Datos de Resistencia al Corte con la Adición de Relaves y Yeso	53
Tabla 16	Resultados del Ajuste Lineal de los Datos de Resistencia al Corte con la Adición de Relaves y Yeso	53
Tabla 17	Ajuste Polinómico de los Datos de Ángulo de Fricción con la Adición de Relaves y Yeso	54
Tabla 18	Ajuste Polinómico de los Datos de la Cohesión con la Adición de Relaves y Yeso	55
Tabla 19	Ahora Ajustaremos el N de Campo para un Polinomio Interpolador de Grado 2	56
Tabla 20	Valores Ncampo del Ensayo SPT Mejorados	57

Tabla 21	Cálculo de los Valores N70 y N60	59
Tabla 22	Cálculo de la Relación de Esfuerzos Cíclicos (t_l/σ'_v) y Relación de Esfuerzos de Corte Debido al Sismo (t_d/σ'_v)	59
Tabla 23	Cálculo del Factor de Licuefacción	60
Tabla 24	Valores Ncampo del Ensayo SPT Mejorados	63
Tabla 25	Cálculo de los Valores N70 y N60	65
Tabla 26	Cálculo de la Relación de Esfuerzos Cíclicos (t_l/σ'_v) y Relación de Esfuerzos de Corte Debido al Sismo (t_d/σ'_v)	66
Tabla 27	Cálculo del Factor de Licuefacción	67
Tabla 28	Porcentaje de Mejora con Columnas de Grava	71
Tabla 29	Porcentaje de Mejora con Inyección de Estabilizadores Químicos	73
Tabla 30	Comparación de los Parámetros en las Tres Condiciones del Suelo	73
Tabla 31	Comparación del potencial de licuefacción en las 3 condiciones del suelo	80
Tabla 32	Comparación de la capacidad portante dinámica y estática en las tres condiciones del suelo	81
Tabla 33	Porcentaje de mejora de la capacidad portante dinámica y estática en las tres condiciones del suelo.....	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Árbol de Problemas Identificados en el Estudio	3
Figura 2	Variación de la Relación de Esfuerzos Cíclicos con el Ensayo de Penetración Estándar Para Diversos	16
Figura 3	Condición de Carga Efectiva, Según Nivel Freático	18
Figura 4	Variación de $N_{\gamma E} / N_{\gamma}$ y $N_{q E} / N_q$ con $\tan\theta$	22
Figura 5	Variación de N_q y N_{γ}	23
Figura 6	Golpeo SPT Antes y Después del Tratamiento, en Arenas Limpias (Báez 1995)	26
Figura 7	Registros de SPT en los Cuatro Tanques, Antes y Después del Mejoramiento (Flores et al., 2022, p. 6)	31
Figura 8	Evaluación del Nivel de Riesgo Inducido en la Superficie del Terreno Mejorado, a partir de Sondajes SPT (12,13)	34
Figura 9	Variación de la Humedad con el Porcentaje de Silicato de Calcio (Velandia Rativa, 2019, p. 78)	35
Figura 10	Mejora en la Cohesión al Corte del Suelo Arcilloso con la Adición de Residuos de Yeso y Relaves de Estaño (Apriyanti et al., 2019, p. 3)	36
Figura 11	Mejora en la Cohesión al Corte del Suelo Arcilloso con la Adición de Residuos de Yeso y Relaves de Estaño (Apriyanti et al., 2019, p. 3)	37
Figura 12	Mejora en la Resistencia al Corte del Suelo Arcilloso con la Adición de Residuos de Yeso y Relaves de Estaño (Apriyanti et al., 2019, p. 4)	38
Figura 13	Resultados del Ensayo SPT	45
Figura 14	Comparación de los Parámetros en las Tres Condiciones del Suelo	74
Figura 15	Comparación de la Cohesión en las Tres Condiciones del Suelo	74
Figura 16	Comparación del Ángulo de Fricción en las Tres Condiciones del Suelo ...	75
Figura 17	Comparación del Esfuerzo Cortante en las Tres Condiciones del Suelo	75
Figura 18	Comparación del Peso Específico 1 en las Tres Condiciones del Suelo	76
Figura 19	Comparación del N a 1m en las Tres Condiciones del Suelo	76
Figura 20	Comparación del N a 1.5m en las Tres Condiciones del Suelo.....	77
Figura 21	Comparación del N a 2m en las Tres Condiciones del Suelo	77
Figura 22	Comparación del N a 3m en las Tres Condiciones del Suelo	78
Figura 23	Comparación del N a 4m en las Tres Condiciones del Suelo	78

Figura 24	Comparación del N a 5m en las Tres Condiciones del Suelo	79
Figura 25	Mejora del Ncampo en las 3 condiciones del suelo	79
Figura 26	Comparación de la capacidad portante dinámica y estática en las Tres Condiciones del Suelo	81

ÍNDICE DE FÓRMULAS

Fórmula 1	Esfuerzo de corte promedio inducido por terremoto	14
Fórmula 2	Corrección por carga efectiva	14
Fórmula 3	Esfuerzo efectivo	15
Fórmula 4	Resistencia a la penetración estándar bajo presión efectiva	15
Fórmula 5	Ncampo corregido	15
Fórmula 6	Factor de reducción	17
Fórmula 7	Factor de licuefacción	17
Fórmula 8	Carga efectiva caso 1	18
Fórmula 9	Densidad efectiva del suelo	18
Fórmula 10	Carga efectiva caso 2	19
Fórmula 11	Cohesión reducida	19
Fórmula 12	Angulo de fricción reducido	19
Fórmula 13	Factor de capacidad de carga N_q	19
Fórmula 14	Factor de capacidad de carga N_c	19
Fórmula 15	Factor de capacidad de carga N_γ	19
Fórmula 16	Factor de forma F_{cs}	19
Fórmula 17	Factor de forma F_{qs}	19
Fórmula 18	Factor de forma $F_{\gamma s}$	19
Fórmula 19	Relación ancho-profundidad de cimentación caso 1	20
Fórmula 20	Relación ancho-profundidad de cimentación caso 2	20
Fórmula 21	Factor de profundidad F_{qd}	20
Fórmula 22	Factor de profundidad F_{cd}	20
Fórmula 23	Factor de profundidad F_{yd}	20
Fórmula 24	Factor de inclinación F_{ci} , F_{qi}	20
Fórmula 25	Factor de inclinación $F_{\gamma i}$	20
Fórmula 26	Carga última estática	20
Fórmula 27	Capacidad portante estática	20
Fórmula 28	Carga efectiva transmitida	21
Fórmula 29	Parámetro dinámico condición crítica	21
Fórmula 30	Coefficiente de aceleración horizontal critico	22
Fórmula 31	Coefficiente de aceleración horizontal	22

Fórmula 32	Carga última dinámica	23
Fórmula 33	Capacidad portante dinámica	23
Fórmula 34	Cohesión por columna de grava	25
Fórmula 35	Angulo de fricción por columna de grava	25
Fórmula 36	Esfuerzo cortante por columna de grava	25
Fórmula 37	Carga última por columna de grava	25
Fórmula 38	Carga admisible por columna de grava	25
Fórmula 39	Densidad del suelo por columna de grava	25
Fórmula 40	Relación área-espaciamiento columna de grava	25

RESUMEN

Este estudio se enfocó en la evaluación de técnicas geotécnicas aplicadas a suelos con potencial de licuación en Talara, Piura, Perú, específicamente mediante el uso de columnas de grava y la inyección de estabilizadores químicos. Adoptando un enfoque descriptivo, explicativo y correlacional, se abordaron las dificultades asociadas a suelos de baja capacidad portante y se profundizó en el comportamiento de las cimentaciones superficiales. Para llevar a cabo la investigación, se recopiló pruebas geotécnicas antes y después de aplicar las técnicas de mejora del suelo. Los métodos de mejora se evaluaron en términos de su capacidad para aumentar la resistencia del suelo y reducir el potencial de licuación, utilizando pruebas de campo y laboratorio, tales como el Ensayo de Penetración Estándar (SPT) y pruebas de corte triaxial. Utilizando Excel 2016 para el análisis y fundamentándose en datos de múltiples fuentes, se evidenció un aumento del 32% en cohesión y un incremento del 22.7% en el ángulo de fricción mediante la inyección de estabilizadores. Por otro lado, las columnas de grava reflejaron una mejora impresionante del 775% en el valor de "N de campo" a una profundidad de 1 metro. En conclusión, ambas intervenciones geotécnicas demuestran ser altamente efectivas en la optimización de las características mecánicas de suelos propensos a la licuación, aunque cada una presenta ventajas distintivas.

Palabras clave: Soluciones geotécnicas, licuación de suelos, columnas de grava, estabilizadores químicos, capacidad portante, cimentaciones superficiales, cohesión, ángulo de fricción.

ABSTRACT

This study focused on the evaluation of geotechnical techniques applied to soils with liquefaction potential in Talara, Piura, Peru, specifically through the use of gravel columns and the injection of chemical stabilizers. Adopting a descriptive, explanatory, and correlational approach, difficulties associated with low bearing capacity soils were addressed, and the behavior of shallow foundations was explored in depth. To conduct the research, geotechnical tests were compiled before and after applying soil improvement techniques. The enhancement methods were evaluated in terms of their ability to increase soil resistance and reduce liquefaction potential, using field and laboratory tests, such as the Standard Penetration Test (SPT) and triaxial shear tests. Utilizing Excel 2016 for analysis and basing on data from multiple sources, a 32% increase in cohesion and a 22.7% increase in the friction angle were evidenced through the injection of stabilizers. On the other hand, gravel columns reflected an impressive 775% improvement in the "N field" value at a depth of 1 meter. In conclusion, both geotechnical interventions prove to be highly effective in optimizing the mechanical characteristics of soils prone to liquefaction, although each presents distinctive advantages.

Keywords: Geotechnical solutions, liquefiable soils, gravel columns, chemical stabilizers, bearing capacity, shallow foundations, cohesion, friction angle.

INTRODUCCIÓN

En diversas zonas del Perú, particularmente en regiones como Talara, Piura, se identifican suelos con alto potencial de licuación, representando un reto considerable para proyectos constructivos. Estos suelos, predominantemente arenosos y arcillosos, poseen propiedades mecánicas que pueden comprometer la estabilidad y durabilidad de las estructuras, generando fenómenos como asentamientos diferenciales y disminución de la resistencia al cortante. Ante la imperativa necesidad de garantizar la seguridad y operatividad de infraestructuras vitales, como hospitales y centros educativos, emergen soluciones geotécnicas, tales como las columnas de grava y la inyección de estabilizadores químicos, como alternativas prometedoras para contrarrestar estos desafíos geotécnicos.

El propósito central de este estudio es analizar y comparar la eficacia de estas intervenciones geotécnicas en la modificación de las características mecánicas de los suelos de Talara, Piura, con el fin de discernir cuál de ellas proporciona una mejora más significativa en términos de resistencia y minimización de asentamientos.

El **Capítulo I** aborda la problemática asociada a los suelos potencialmente licuables, definiendo el contexto, el alcance del estudio y subrayando la importancia de esta investigación en el ámbito geotécnico.

El **Capítulo II** proporciona una revisión literaria meticulosa, congregando conocimientos de fuentes tanto nacionales como internacionales que sirven de cimiento teórico para la investigación.

En el **Capítulo III**, se establecen las hipótesis, tanto generales como específicas, que se orientan a validar las mejoras en las propiedades del suelo al aplicar las técnicas geotécnicas en cuestión.

El **Capítulo IV** expone con claridad la metodología adoptada, detallando el enfoque, la naturaleza y el diseño del estudio, garantizando la rigurosidad y validez de los resultados. Finalmente, el **Capítulo V** despliega un diagnóstico profundo de la situación geotécnica en Talara, Piura, seguido de la recolección, procesamiento y análisis de datos. Concluye con la verificación de las hipótesis planteadas y la presentación de los hallazgos y resultados derivados del estudio.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO Y DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática

1.1.1 Problema e importancia

La ingeniería civil enfrenta constantemente el desafío de construir sobre suelos con características geotécnicas desfavorables. Uno de los problemas más críticos es la presencia de suelos potencialmente licuables, que pueden comprometer la integridad de las cimentaciones superficiales. Estos suelos, al ser sometidos a cargas dinámicas como las producidas por sismos, pueden perder su capacidad portante, generando asentamientos diferenciales, inclinaciones, vuelcos y daños a infraestructuras y servicios públicos (Fernández-Diéguez et al., 2017).

En la región de Piura, Perú, la problemática de los suelos licuables ha sido una preocupación constante debido a su ubicación sísmológica y las características geotécnicas de sus suelos (Chumacero Agurto & Flores Jimenez, 2022). Diversas soluciones geotécnicas han sido propuestas para tratar estos suelos y mejorar su comportamiento mecánico. Entre estas soluciones, las columnas de grava y la inyección de estabilizadores químicos han ganado relevancia en los últimos años (Fernandez Silva & Vasquez Diaz, 2022). Las columnas de grava, por ejemplo, buscan rigidizar los suelos blandos cohesivos, incrementando su capacidad portante y acelerando su proceso de consolidación (Falla Rufasto, 2021).

Por otro lado, las técnicas de inyección de estabilizadores químicos buscan mejorar las propiedades físicas y mecánicas del suelo, reduciendo su permeabilidad y aumentando su resistencia (Ochoa-Cornejo & Muñoz, 2017). Sin embargo, a pesar de los avances y estudios realizados, aún existen interrogantes sobre cuál de estas soluciones es la más adecuada para determinadas condiciones geotécnicas y qué impacto real tienen en el comportamiento mecánico de las cimentaciones superficiales (Alva Hurtado, 2011).

Además, es crucial considerar que las soluciones geotécnicas no solo deben ser efectivas desde el punto de vista técnico, sino también sostenibles y económicamente viables para la región de Piura (Chumacero Agurto & Flores Jimenez, 2022). La elección de una solución geotécnica adecuada puede tener un impacto significativo en la seguridad y durabilidad de las infraestructuras, así como en la economía local (Fernandez Silva & Vasquez Diaz, 2022).

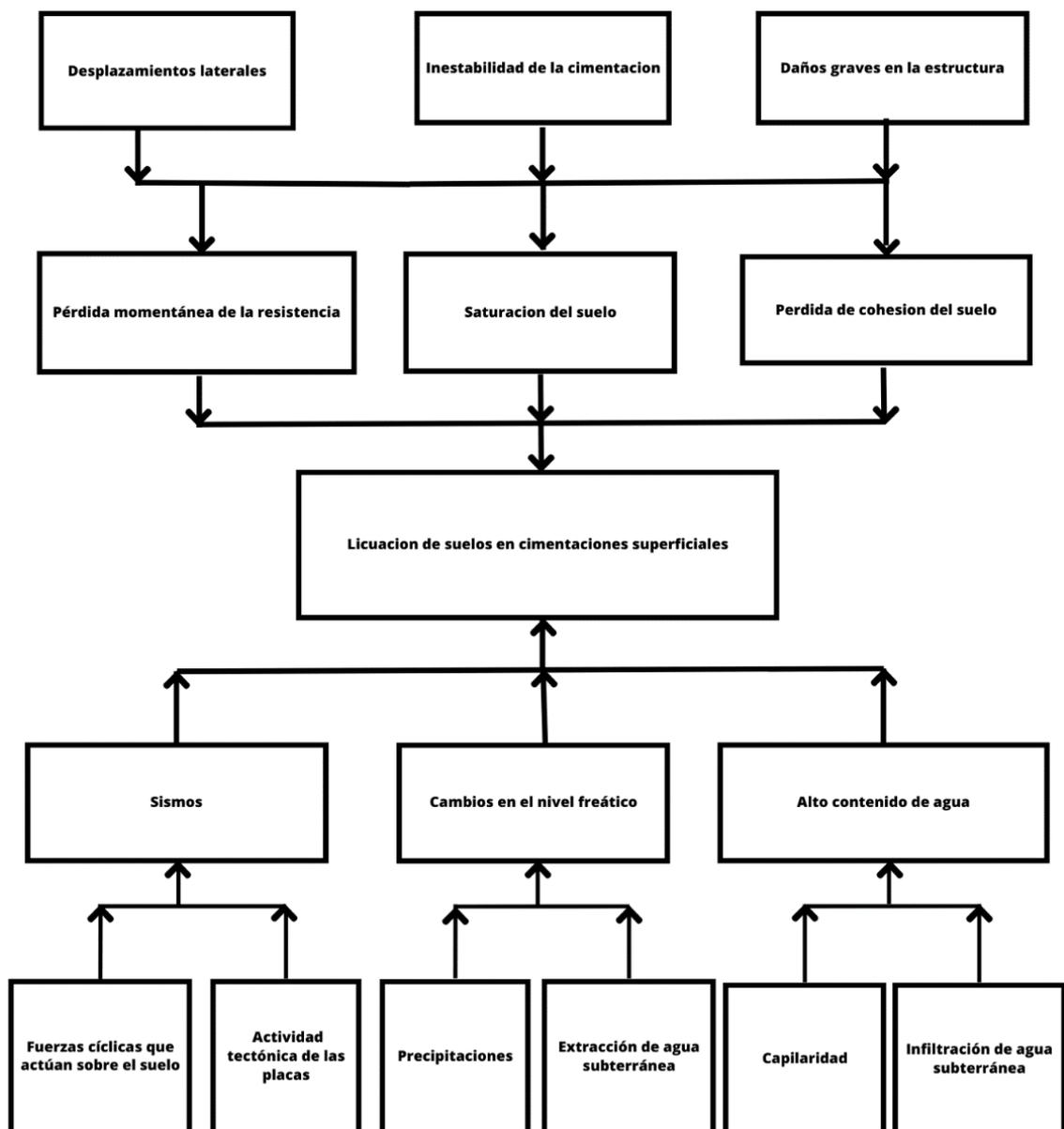
Por lo tanto, es imperativo realizar un análisis comparativo y detallado de estas soluciones geotécnicas, con el fin de determinar su eficacia y aplicabilidad en contextos específicos, considerando tantos aspectos técnicos como socioeconómicos (Falla Rufasto, 2021; Ochoa-Cornejo & Muñoz, 2017).

1.1.2 Árbol del problema (Causas – Problema - Consecuencias)

Para comprender el problema al cual nos enfrentamos se desarrolló un árbol del problema causas-problema-consecuencias, ilustrado en la Figura 1.

Figura 1

Árbol de Problemas Identificados en el Estudio



Nota. Elaboración propia

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cómo son las soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables para mejorar el comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales?

1.2.2 Problemas específicos

a) ¿Cómo son las soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables empleando columnas de grava como método de mejora del suelo para mejorar el comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales?

b) ¿Cómo son las soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables empleando técnicas de inyección de estabilizadores químicos para mejorar el comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales?

1.3 Objetivo general y específico

1.3.1 Objetivo general

Comparar las soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables para mejorar el comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales.

1.3.2 Objetivos específicos

a) Analizar las soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables empleando columnas de grava como método de mejora del suelo para mejorar el comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales.

b) Analizar las soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables empleando técnicas de inyección de estabilizadores químicos para mejorar el comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales.

1.4 Delimitación de la investigación

1.4.1 Delimitación geográfica

La investigación se llevará en Talara, Piura, en el país de Perú a base de datos documentales. Se centrará en la ubicación de Talara en el departamento de Piura para analizar las soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables con fines de cimentaciones superficiales en esta región.

1.4.2 Delimitación temporal

El estudio se realizará durante el período comprendido entre mayo y octubre de 2023. Durante este tiempo, se recopilarán los datos necesarios y se llevarán a cabo las investigaciones pertinentes.

1.4.3 Delimitación de la temática

La temática principal de la investigación es el análisis de las soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables para mejorar el comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales. Se enfocará en el estudio de dos métodos específicos: el uso de columnas de grava y las técnicas de inyección de estabilizadores químicos.

1.4.4 Delimitación muestral

El tamaño y las características de la muestra dependerán de la disponibilidad de sitios de cimentaciones superficiales en suelos potencialmente licuables en la zona de estudio. Se seleccionarán casos representativos que permitan analizar y comparar los efectos de las soluciones geotécnicas aplicadas.

1.5 Justificación de la investigación

1.5.1 Conveniencia

El estudio es conveniente realizarlo en Talara, Piura, debido a la presencia de suelos potencialmente licuables y la importancia de las cimentaciones superficiales en la región. Existen recursos disponibles y acceso a la información necesaria para llevar a cabo la investigación.

1.5.2 Relevancia social

La investigación contribuirá a abordar la problemática de los suelos potencialmente licuables en cimentaciones superficiales, lo que puede tener un impacto significativo en la seguridad y estabilidad de las estructuras en la zona. Esto beneficiará directamente a la comunidad local y a la sociedad en general.

1.5.3 Aplicaciones prácticas

Los resultados de la investigación proporcionarán información valiosa sobre las soluciones geotécnicas aplicadas en suelos potencialmente licuables, lo cual tendrá aplicaciones prácticas en la planificación y diseño de cimentaciones superficiales en la zona de estudio.

1.5.4 Utilidad metodológica

El estudio contribuirá al desarrollo y mejora de los métodos y enfoques de investigación existentes en el campo de la geotecnia. Se utilizarán técnicas y herramientas adecuadas para evaluar el comportamiento mecánico de las cimentaciones en suelos potencialmente licuables.

1.5.5 Valor teórico

La investigación ampliará los conocimientos teóricos existentes sobre las soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables en cimentaciones superficiales.

Se generarán nuevos datos y se realizará un análisis crítico de la literatura científica relacionada.

1.6 Importancia del estudio

1.6.1 Nuevos conocimientos

El estudio proporcionará nuevos conocimientos sobre la efectividad y viabilidad de las soluciones geotécnicas aplicadas en suelos potencialmente licuables en cimentaciones superficiales. Esto ayudará a llenar la brecha de información en esta área de investigación.

1.6.2 Aporte

La investigación contribuirá al campo académico y profesional al proporcionar información valiosa y práctica sobre las soluciones geotécnicas aplicadas en suelos potencialmente licuables en cimentaciones superficiales.

1.7 Limitaciones del estudio

1.7.1 Falta de estudios previos de investigación

La falta de investigaciones previas en la zona de estudio sobre las soluciones geotécnicas en suelos potencialmente licuables puede limitar la disponibilidad de datos y referencias específicas.

1.7.2 Metodológicos o prácticos

Pueden surgir limitaciones relacionadas con la disponibilidad de recursos, herramientas y técnicas específicas para la recopilación y análisis de datos en el campo de la geotecnia.

1.7.3 Medidas para la recolección de los datos

La recopilación de datos requerirá la realización de investigaciones de campo, lo cual puede estar sujeto a limitaciones logísticas y de tiempo. Sin embargo, en nuestro caso será documental ya que nos basaremos en estudios ya antes hechos.

1.7.4 Obstáculos en la investigación

Podrían surgir obstáculos o dificultades en la ejecución de la investigación, como condiciones climáticas adversas, restricciones de acceso a sitios de construcción y colaboración limitada de los actores involucrados.

1.8 Alcance

El estudio se centrará específicamente en las soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables en cimentaciones superficiales en la zona de Talara, Piura, en Perú. Se evaluarán dos métodos en particular: el uso de columnas de grava y las técnicas de inyección de estabilizadores químicos.

1.9 Viabilidad del estudio

El estudio es viable en términos de recursos disponibles, acceso a la ubicación de investigación, disponibilidad de casos de estudio y colaboración con profesionales y expertos en el campo de la geotecnia. Se establecerá un plan de trabajo adecuado para garantizar la realización efectiva de la investigación en el tiempo asignado.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Marco histórico

La presente investigación se enfoca en comparar los resultados obtenidos por 2 diferentes soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables en la ciudad de Talara, Piura, Perú. Por lo que es necesario describir las propiedades mecánicas de estos suelos e interpretar correctamente los datos de entrada, así como los resultados obtenidos.

Ortiz et al. (2022), en su investigación, exploraron los fenómenos de licuefacción de suelos y otros eventos sísmicos asociados que ocurrieron en la ciudad de Chone durante el terremoto de 2016 en la costa de Ecuador. El estudio se enfocó en analizar los daños y alteraciones geotécnicas causadas por la licuefacción, utilizando datos y observaciones recopiladas durante y después del evento sísmico. Los autores destacaron la importancia de los mapas de riesgo de licuefacción, que ganaron prominencia tras los devastadores terremotos de 1964 en Alaska y Niigata, como herramientas cruciales para la planificación y toma de decisiones en áreas propensas a la licuefacción. Este trabajo proporciona un análisis detallado de los fenómenos de licuefacción y ofrece insights valiosos para futuras investigaciones y estrategias de mitigación en regiones sísmicamente activas.

Alva H. (1983), en su trabajo, ofrece una perspectiva histórica del fenómeno de licuefacción de suelos en Perú, destacando eventos sísmicos significativos y sus impactos en la geología y estructuras del país. Un evento notable que se discute es el terremoto que afectó a Arequipa el 22 de enero de 1582, que no solo dejó la ciudad en ruinas, sino que también provocó fenómenos geotécnicos notables, como la inundación resultante de la disminución y presión del agua, según lo documentado por Silgado (1978, citado en Alva Hurtado, 1983). Este terremoto, que tuvo una magnitud de X en la escala MM, también afectó el acceso al puerto de Islay debido a inundaciones en la playa, ilustrando la amplia gama de impactos que los terremotos y la licuefacción del suelo pueden tener en las infraestructuras y geografía locales.

Alva H. (1983), en su obra, ofrece una historia concisa sobre el fenómeno de la licuefacción de suelos en Perú, destacando eventos sísmicos históricos y sus impactos geotécnicos. El 14 de febrero de 1619, un terremoto devastó el norte de Perú, especialmente afectando a Trujillo, donde las edificaciones sufrieron daños significativos. Silgado (1978, citado en Alva, 1983) hace referencia a la crónica de Madzibaba Calanch,

que describe cómo la tierra se fracturó en varios lugares, liberando un lodo oscuro de las fisuras. Feijo detalla la emisión de compuestos tóxicos y venenosos que se mezclaron con agua de cal, generando corrientes de agua de gran volumen que inundaron áreas rurales como Villa del Santa y Barranca, entre otras. También se informó sobre otros efectos en las áreas circundantes, como el surgimiento de agua en ríos desbordados y el impacto del flujo de agua en estos ríos. La intensidad del terremoto se calculó en nueve puntos.

Forcellini D. (2020), en su artículo, realiza un análisis sobre la interacción suelo-estructura de estructuras poco profundas situadas en un depósito de suelo con potencial de licuefacción. La licuefacción ha mostrado sus consecuencias devastadoras en varios terremotos históricos, tales como los ocurridos en Niigata (Japón) en 1964, Dagupan City (Filipinas) en 1990, Chi-Chi (Taiwán) en 1999, Japón en 2011, Kocaeli (Turquía) en 1999 y Christchurch (Nueva Zelanda) en 2011. Los riesgos más notables asociados a este fenómeno suelen manifestarse en estructuras que dependen de cimentaciones superficiales, siendo los efectos predominantes los asentamientos estructurales, la propagación lateral y las disminuciones en la capacidad portante del suelo.

2.2 Antecedentes del estudio de investigación

2.2.1 Antecedentes internacionales

Ortiz et al. (2022), en su estudio, exploran la licuefacción del suelo y otros fenómenos sísmicos asociados en la ciudad de Chone durante el terremoto de 2016 en la costa de Ecuador. La licuefacción del suelo inducida por terremotos puede generar una variedad de perjuicios, incluyendo la destrucción, ya sea parcial o total, de edificaciones, así como daños severos en redes de transporte e infraestructuras críticas. Este peligro ha emergido como uno de los temas más relevantes en la ingeniería geotécnica y geológica contemporánea, respaldado por numerosos movimientos sísmicos originados por vibraciones del terreno. Este contexto ha incentivado el desarrollo de nuevas técnicas para evaluar los estratos que los caracterizan.

Bautista P. & Mayorga M. (2018), en su tesis de pregrado, realizaron un análisis del mejoramiento de suelos empleando el método de columnas de grava. La investigación, llevada a cabo en la Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga, Escuela de Ingeniería, mostró que las columnas de grava, según los resultados obtenidos del desarrollo experimental, evidencian una disminución clara en los asentamientos producidos por la carga axial. Se mostraron diferencias en el asentamiento del suelo mejorado con columna de grava respecto al suelo sin mejorar de hasta un 25% de reducción. Sin embargo, por contraparte, se evidencia claramente un valor mayor de la

columna de grava en los asentamientos inmediatos. Lo anterior se puede atribuir a que, al momento de aplicar la carga, la grava se incrusta en el suelo de fundación hasta llegar a un estado en que este trabaja como un material compuesto entre grava y arcilla.

Velandia D. & Lopez N. (2019), en su estudio, exploraron la variación de las propiedades fisicoquímicas de los suelos del depósito lacustre de la Ciudad de Tunja, específicamente en la Zona Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. A lo largo de varias décadas, se ha buscado activamente distintos materiales y métodos que puedan mitigar las alteraciones abruptas del suelo y, simultáneamente, potenciar sus propiedades mecánicas. Un método destacado es la inyección de diferentes minerales en variadas concentraciones. En 1915, Albert Francois identificó que la eficacia de una inyección de cemento podía ser potenciada si era precedida de silicato sódico. Posteriormente, el ingeniero Hugo Joosten implementó la inyección de silicato sódico en forma de lechada en cimentaciones profundas, seguido de una inyección de cloruro cálcico. En 1967, España incorporó la técnica de inyección en la construcción de sus sistemas de metro. Esta técnica, que se desarrolló principalmente en Japón, fue comparada con otras técnicas de mejora del suelo por Álvaro López Ruiz, quien verificó que la estabilización con silicatos de sodio era sumamente eficaz, aunque también implicaba costes elevados.

Chávez E. & Chaguala Y. (2019), en su estudio, evaluaron la resistencia de un suelo grueso reforzado con fibras de coco (cocotero, cocos nucifera). Las inyecciones granulares, que involucran suspensiones de arcilla, cal, cemento, entre otros, tuvieron su inicio en el siglo pasado, mientras que las inyecciones químicas, que utilizan soluciones líquidas capaces de endurecer, comenzaron a mediados de este siglo, especialmente en los años 60, siendo conocidas como inyecciones estructurales. Más recientemente, se ha observado el uso de "inyecciones de compactación" para recalces y en túneles de metro excavados en suelos sedimentarios, así como las "inyecciones de chorro", que están siendo principalmente desarrolladas en Japón.

2.2.2 Antecedentes nacionales

Farina H. & Huapaya M. (2019), en su trabajo, formulan una cimentación superficial para un centro comercial de tres pisos en una zona con suelos licuables en La Encantada – Chorrillos. Las cimentaciones desempeñan un papel crucial al transferir las cargas vivas, muertas y las generadas por eventos como sismos o vientos desde la estructura hasta el suelo. Estos elementos se distinguen por tener dos áreas diferenciadas: una que está en contacto con la estructura (columna) y otra que está en contacto con el suelo (base de la cimentación). En la parte superior de la cimentación, el área es más pequeña que en la

parte inferior, siendo esta última la que recibe las cargas de la estructura. De esta manera, las fuerzas recibidas se distribuyen de forma más eficiente en el suelo, generando un valor de tensión que el suelo es capaz de soportar.

Rivera I. (2020), en su tesis de pregrado, analiza el impacto de los estabilizadores químicos, específicamente la cal, en las propiedades mecánicas de un suelo expansible en la urbanización Santa María IV Etapa, Trujillo. La investigación revela que la cal, como estabilizador, influye positivamente en las propiedades mecánicas del suelo expansible en estudio, las cuales están condicionadas por factores como la densidad del suelo, su contenido de humedad y su capacidad de carga. Durante el proceso de estabilización, se observó un incremento en la humedad requerida, atribuido a la reacción exotérmica generada por la cal, lo que a su vez resultó en un aumento significativo en la capacidad de soporte del suelo.

Bellido G. & Camayo Y. (2022), en su estudio, exploran el potencial de licuación y las estrategias para mejorar los suelos arenosos en el sector de Lomo de Corvina - Villa el Salvador. La investigación destaca el uso de columnas de grava como método para mejorar suelos blandos cohesivos, rigidizándolos mediante la introducción de estas columnas en agujeros creados por un vibrador o otro equipo de perforación convencional, dependiendo del método de ejecución seleccionado. Este enfoque no solo aumenta la capacidad portante del suelo, sino que también mejora la estabilidad contra deslizamientos en terraplenes, acelera la consolidación del suelo (al crear drenajes verticales), y reduce los asentamientos en servicio. La técnica puede aplicarse en una variedad de suelos, incluyendo arenas limosas, limos, limos arcillosos, arcillas y rellenos heterogéneos.

2.2.3 Artículos relacionados con el tema

Fernández et al. (2017), en su artículo, abordan la susceptibilidad a la licuefacción de los suelos en la ciudad de Caimanera, Guantánamo, destacando la complejidad y la importancia crítica del campo de la licuefacción del suelo en la ingeniería. Este fenómeno tiene implicaciones significativas para la vida humana, especialmente en términos de cómo los suelos responden a los terremotos, lo que lo convierte en un área de estudio vital para garantizar la seguridad y la estabilidad de las estructuras en zonas propensas a la actividad sísmica.

Ochoa F. & Muñoz S. (2017), en su artículo, discuten el fenómeno de la licuefacción, que induce significativas deformaciones en el suelo, especialmente en áreas costeras, y es comúnmente desencadenado por terremotos de gran magnitud. En los últimos años, se

han realizado esfuerzos considerables para desarrollar y aplicar métodos que incrementen efectivamente la resistencia del suelo a la licuefacción, siendo la Laponite una nanotecnología que ha demostrado ser capaz de retardar este fenómeno.

En el estudio realizado por Flores et al. (2022), se exploró el análisis, diseño y construcción de un sistema de mejoramiento de suelos utilizando Columnas de Grava Compactada para fundamentar cuatro tanques de almacenamiento de Aguas Amargas en la Refinería Dos Bocas, Tabasco, México. Se implementaron un total de 980 elementos, cada uno con una longitud de 12.5 m y un diámetro de 0.5 m, para reforzar el suelo de cimentación, con la finalidad de mitigar el potencial de licuefacción y minimizar los asentamientos. La investigación concluye que la utilización de Columnas de Grava Compactada es una estrategia costo-eficiente para fundamentar tanques de almacenamiento en zonas susceptibles a la licuefacción.

En un estudio realizado por Tefera et al. (2023), se abordó la aplicación de materiales columnares verticales hechos de gravas naturales o agregados triturados como una práctica común para mejorar el rendimiento de terrenos de arcilla blanda bajo carga de cimentación. El estudio específicamente evaluó la efectividad de la columna de grava de ceniza encerrada en geotextil para mejorar la deformación y la capacidad de carga del terreno de arcilla blanda. Los hallazgos revelaron que la capacidad de carga máxima de la cimentación de arcilla blanda reforzada con grava de ceniza convencional fue 1.85 veces la del suelo de arcilla blanda no tratado.

En un estudio llevado a cabo por Fernández et al. (2017), se exploró la susceptibilidad a la licuefacción de los suelos en la ciudad de Caimanera, ubicada en la provincia de Guantánamo. El principal objetivo de la investigación fue evaluar las condiciones ingeniero-geológicas de estos suelos para determinar su potencial de licuefacción. Se consideró la posible amplificación de las ondas sísmicas, tomando en cuenta el efecto de sitio basado en las propiedades físico-mecánicas del área en estudio.

A través de un sistema de indicadores que incluyó parámetros ingeniero-geológicos y el cálculo del factor de seguridad para la licuefacción, se llegó a la conclusión de que los suelos con mayor potencial de licuefacción se localizan en el centro de la ciudad. Esta área no solo representa el mayor asentamiento poblacional, sino que también el material de relleno existente se comporta como un suelo tipo arena arcillosa y arcilla arenosa con grava.

En una investigación realizada por Ochoa F. & Muñoz S. (2017), se abordó el problema recurrente de la licuefacción de depósitos de arena suelta, que ha sido responsable de

daños significativos en eventos sísmicos de gran magnitud en diversas regiones, incluyendo Chile. Dada la necesidad de desarrollar métodos de mejora del suelo para contrarrestar la licuefacción, especialmente en áreas cercanas a estructuras ya existentes, los autores exploraron el uso de Laponita, una nano-arcilla sintética con un diámetro considerablemente menor que la Bentonita. Los resultados de ensayos triaxiales cíclicos mostraron que la incorporación de un 1% de Laponita en la arena incrementó notablemente la resistencia a la licuefacción. Esta mejora en la resistencia fue comparable a la proporcionada por la Bentonita, pero utilizando una menor cantidad de material. Los autores también discutieron los mecanismos detrás de esta mejora, atribuyéndola al fluido tixotrópico formado en los poros de las arenas.

Forcellini (2020) aborda el fenómeno globalmente observado de la licuefacción del suelo durante terremotos históricos. Los fenómenos relacionados con la licuefacción pueden causar daños, interrupciones funcionales y gastos considerables en la reposición de estructuras. En su estudio, Forcellini se propone modelar los efectos de la licuefacción en diversas configuraciones estructurales asentadas sobre cimentaciones superficiales, utilizando simulaciones numéricas tridimensionales (3D).

Para ello, el suelo se modela con materiales histéricos no lineales y modelos avanzados de plasticidad capaces de reproducir la tendencia observada a una fuerte dilatación y el aumento en la rigidez y resistencia al corte cíclico. El autor emplea OpenSeesPL para investigar los complejos análisis no lineales de la interacción suelo-estructura (SSI) con licuefacción. Se discuten los resultados de desempeño estructural 3D, en términos de desplazamientos y deriva, de edificios de referencia fundados sobre cimentaciones superficiales.

2.3 Estructura teórica y científica que sustenta el estudio

2.3.1 Factor de licuefacción del suelo

El factor de licuefacción del suelo se refiere a la relación entre la resistencia al corte no drenada del suelo en condiciones estáticas y su resistencia al corte no drenada durante un evento sísmico (Ortiz et al. 2022).

El método simplificado de Seed e Idriss es una técnica empírica que se utiliza para evaluar el potencial de licuefacción de los suelos durante los terremotos. Este método, que se utilizó inicialmente para analizar el terremoto de Niigata de 1964, utiliza el número de golpes que puede soportar un suelo, obtenido mediante una prueba de penetración estándar (SPT), para predecir su comportamiento a una profundidad determinada.

En 1983, este método fue revisado y ampliamente adoptado en países como Estados Unidos, China y Japón, estableciendo nuevos criterios para evaluar el potencial de licuefacción de un suelo. En 1986 se añadió al método un criterio adicional que tiene en cuenta la cantidad de finos del suelo y su impacto en el potencial de licuefacción.

Según Chumacero A. & Flores J. (2022), "Seed e Idriss propusieron que se puede evaluar la relación de esfuerzo cíclico de cualquier tipo de suelo y a una profundidad definida que transcurra en un terremoto por medio de la fórmula 1”:

$$\frac{\tau_d}{\sigma_0} = 0.65 \frac{a \max \sigma_0}{g \bar{\sigma}_0} r_d \dots \dots \dots (fórmula 1)$$

dónde:

$\frac{\tau_d}{\sigma_0}$ = esfuerzo de corte promedio inducido por terremoto

$a \max$ = aceleración máxima en la superficie del terreno

g = aceleración de la gravedad

$\bar{\sigma}_0$ = esfuerzo total vertical según la profundidad tomada.

r_d = factor de reducción

CN = Corrección por sobrecarga efectiva. Gracias a N_{spt} junto con El esfuerzo de sobrecarga efectivo aumenta, se aplica el factor de corrección (semilla e Idriss 1982).

$$N_1 = N_m * cN$$

Se recomienda determinar el factor CN utilizando la fórmula 2 propuesta por Liao y Whitman, 1988. siempre y cuando la sobrecarga efectiva sea inferior a 200 kPa.

$$CN = \sqrt{\frac{p_z}{\sigma'_{v0}}} \leq 1.7 \dots \dots \dots (fórmula 2)$$

Para σ'_{v0} en kg/cm², Pa=1 kg/cm²

Según Robertson, P y Wride, C. Evaluating Cyclic Liquefaction Potencial Using the Cone Penetration Test, en la tabla 1 podemos observar los diferentes factores de corrección para el ensayo de penetración estándar.

Tabla 1*Factores de Corrección Para el Ensayo SPT*

Factor	Variable del equipo	Término	Corrección
Presión efectiva	-	C_N	$(Pa/\sigma'_v)^m$
Presión efectiva	-		$CN \leq 1.7$
Relación de energía	Martillo dona		0.5-1.0
Relación de energía	Martillo de seguridad	C_E	0.7-1.2
Relación de energía	Martillo dona automático		0.8-1.3
Diámetro de perforación	65-115 mm		1
Diámetro de perforación	150 mm	C_B	1.05
Diámetro de perforación	200 mm		1.15
Longitud 1	< 3m		0.75
Longitud 2	3-4 m		0.8
Longitud 3	4-6 m	C_R	0.85
Longitud 4	6-10 m		0.95
Longitud 5	10-30 m		1
Método de muestreo	Muestreo estándar		1
Método de muestreo	Muestreo sin revestimiento	C_S	1.1-1.3

Nota. Rios H. & Rojas V. (2020),

El Dr. Ing. Jorge E. Alva Hurtado en su libro Diseño de Cimentaciones indica mediante la fórmula 3 que el esfuerzo efectivo en cualquier dirección está definido como la diferencia entre el esfuerzo total en dicha dirección y la presión del agua que existe en los vacíos del suelo. El esfuerzo efectivo es por lo tanto una diferencia de esfuerzos.

$$\sigma' = (\sigma - \mu) \dots \dots \dots (fórmula 3)$$

De nuestro estudio de mecánica de suelos “Servicio de ingeniería, suministro y construcción de dos tanques de 163 mb para almacenamiento de Diesel en refinería Talara”, se menciona que la resistencia a la penetración estándar de un suelo bajo presión efectiva de 1kg/cm² se determina según fórmulas 4 y 5 de la siguiente forma:

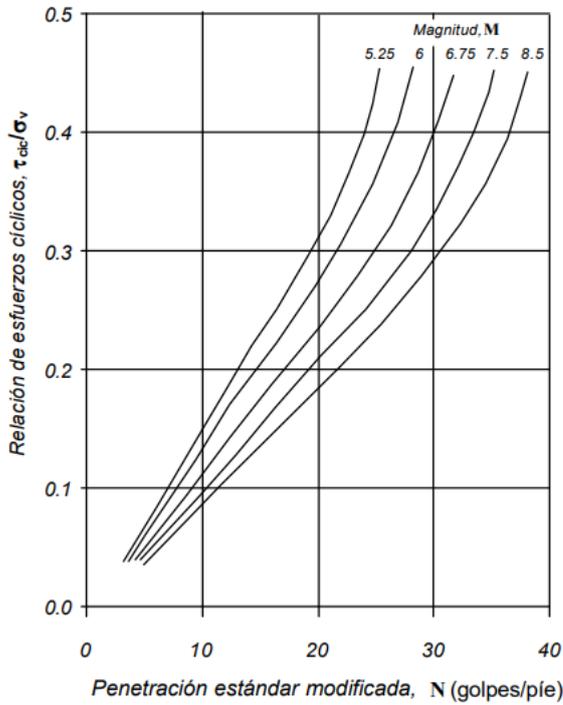
$$N_{70} = C_n * N * n_1 * n_2 * n_3 * n_4 \dots \dots \dots (fórmula 4)$$

$$N_{60} = \left(\frac{70}{60}\right) * N_{70} \dots \dots \dots (fórmula 5)$$

Para la obtención de la relación de esfuerzos cíclicos necesitamos 2 valores, la magnitud del sismo y el valor N corregido, tal y como se muestra en la figura 2.

Figura 2

Variación de la Relación de Esfuerzos Cíclicos con el Ensayo de Penetración Estándar Para Diversos



Nota. Tomado de la NSR-10 (2010)

Dentro de los parámetros de cálculo para la obtención del factor de licuefacción se debe tener en cuenta las condiciones sísmicas según tabla 2, por ello debemos encontrar un factor de corrección en base a la influencia del sismo, llamado también como factor de corrección por magnitud de momento.

Tabla 2

Factores de Corrección por Influencia de la Magnitud del Sismo

Magnitud, M	$CSR_M/CSR_{M=7.5}$
$5\frac{1}{4}$	1.50
6	1.32
$6\frac{3}{4}$	1.13
$7\frac{1}{2}$	1.00
$8\frac{1}{2}$	0.89

Nota. Tomado de Orozco, K. y Seminario, L. (2020).

Antes de obtener la relación de esfuerzos se debe tener en cuenta el factor de reducción del esfuerzo de corte dinámico para tomar en cuenta la deformación elástica del terreno como lo menciona Bellido Garcia, Jordan y Camayo Romero, Yumira en su tesis “Análisis del potencial de licuación para mejorar los suelos arenosos en el sector de Lomo de Corvina - Villa el Salvador” dada por la fórmula 6.

$$rd = 1 - 0.015 * z \dots \dots \dots (fórmula 6)$$

Cada uno de los métodos simplificados descritos, basados en las experiencias de campo y de laboratorio de sus autores, proponen diversas expresiones para evaluar, tanto la relación de esfuerzos que se requiere para causar licuación en un suelo dado, cuyas características son conocidas ($v \tau / \sigma$), como la relación de esfuerzos que induce un movimiento sísmico cuyas características también son conocidas ($v d \tau / \sigma$). Por lo tanto, se puede definir el factor de seguridad contra la ocurrencia del fenómeno de licuación (FL), mediante la fórmula 7.

$$FL = \frac{(\tau l / \sigma' v)}{(\tau d / \sigma' v)} \dots \dots \dots (fórmula 7)$$

Por lo tanto: Si $FL > 1$ no se producirá licuación Si $FL \leq 1$ se producirá licuación.

2.3.2 Suelos potencialmente licuables

Los suelos potencialmente licuables son aquellos que presentan características geotécnicas y geológicas que los hacen susceptibles a la licuefacción durante eventos sísmicos (Ortiz-Hernández, Chunga, Pastor, & Toulkeridis, 2022)

2.3.3 Capacidad portante del suelo en condición estática

La capacidad portante del suelo se refiere a su capacidad para soportar cargas aplicadas sin fallas o asentamientos excesivos. Se determina mediante pruebas geotécnicas y es fundamental para el diseño de cimentaciones (Mondragon , 2022).

Teoría de Terzaghi y Peck (1967), con los parámetros de Vesic (1971) El Dr. Karl Terzaghi fue uno de los pioneros de la ingeniería geotécnica en evaluar las capacidades aceptables de los cimientos poco profundos. Su teoría es aplicable a suelos que presentan cohesión y fricción.

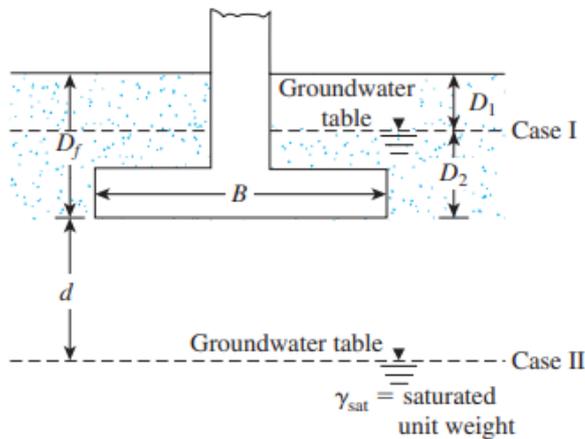
La teoría de Terzaghi, una de las más reconocidas en el campo de la geotecnia, se enfoca en determinar la carga última de las cimentaciones superficiales en función de su profundidad y ancho. Este modelo es aplicable a cimentaciones corridas, cuadradas o circulares.

En su obra " Soil mechanics in engineering practice", Terzaghi y Peck (1973) afirman que las principales propiedades de los suelos y sus agregados varían en función de su

cohesión. Para los suelos granulares y gravosos, sin cohesión, la densidad relativa es crítica, y ésta no depende de la presión estática, sino de los procesos de sedimentación y compactación. En cambio, los suelos cohesivos, como las arcillas, que contienen principalmente características mineralógicas en sus fracciones más finas, requieren considerar la consistencia, que depende principalmente de la aplicación de cargas. Las ecuaciones que se presentan a continuación nos informan sobre la máxima capacidad de carga, bajo la premisa de que el nivel freático se encuentra considerablemente alejado de los cimientos. Sin embargo, si el nivel del agua se sitúa cerca de la base, se requerirán ajustes en las ecuaciones de capacidad de carga. (Consulte la Figura 3)

Figura 3

Condición de Carga Efectiva, Según Nivel Freático



Nota. Tomado del libro Principles of Foundation Engineering (2016)

El Dr. Braja M. Das en su libro “Principles of Foundation Engineering” indica en la fórmula 8 los diferentes casos para el cálculo de la carga transmitida en función de la profundidad de cimentación y el nivel freático.

Caso 1: Si $0 \leq D_1 \leq D_f$

$$q = D_1 * \gamma + D_2 * (\gamma_{sat} - \gamma_w) \dots \dots \dots (fórmula 8)$$

q.- carga efectiva

γ_{sat} .- peso unitario del suelo saturado

γ_w .- peso unitario del agua

Además, el valor de γ en el último término de las ecuaciones debe reemplazarse por:

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \dots \dots \dots (fórmula 9)$$

Caso 2: Si $0 \leq d \leq B$

$$q = \gamma * Df \dots \dots \dots (f\acute{o}rmula 10)$$

γ .- peso unitario del suelo de apoyo

Df.- profundidad de cimentaci3n

En base al tipo de suelo, siendo este granular se considerar3 una falla localizada, lo cual reduce los par3metros de resistencia seg3n la f3rmula 11 y 12 en base a lo que menciona el estudio de mec3nica de suelos “Servicio de ingenier3a, suministro y construcci3n de dos tanques de 163 mb para almacenamiento de Diesel en refiner3a Talara”

$$C' = \frac{2}{3} * C \dots \dots \dots (f\acute{o}rmula 11)$$

$$\Phi' = Arc\ tg\left(\frac{2}{3} * tg(\Phi)\right) \dots \dots \dots (f\acute{o}rmula 12)$$

Donde:

C: Cohesi3n

Φ : Angulo de fricci3n

C': Cohesi3n reducida

Φ' : Angulo de fricci3n reducido

Para la obtenci3n de la capacidad ultima de carga del suelo es necesario obtener diferentes factores de correcci3n seg3n aspectos de carga, forma, profundidad de cimentaci3n e inclinaci3n de carga. Tal y como lo indica el Dr. Braja M. DAS en su libro “Principles of Foundation Engineering”

Factores de capacidad de carga (Nq , Nc , $N\gamma$)

$$Nq = e^{\pi * \tan(\Phi')} * t \tan\left(45 + \frac{\Phi'}{2}\right)^2 \dots \dots \dots (f\acute{o}rmula 13)$$

$$Nc = (Nq - 1) * \cot(\Phi') \dots \dots \dots (f\acute{o}rmula 14)$$

$$N\gamma = 2 * (Nq + 1) * \tan(\Phi') \dots \dots \dots (f\acute{o}rmula 15)$$

Factores de forma (Fcs , Fqs , $F\gamma_s$)

$$Fcs = 1 + \left(\frac{B}{L}\right) * \left(\frac{Nq}{Nc}\right) \dots \dots \dots (f\acute{o}rmula 16)$$

$$Fqs = 1 + \left(\frac{B}{L}\right) * \tan(\Phi') \dots \dots \dots (f\acute{o}rmula 17)$$

$$F\gamma_s = 1 - 0.4 * \left(\frac{B}{L}\right) \dots \dots \dots (f\acute{o}rmula 18)$$

Factores de profundidad (Fcd , Fqd , $F\gamma_d$)

Se utiliza diferentes ecuaciones en base a la relaci3n que existe entre la profundidad y el ancho de la cimentaci3n.

$$\frac{Df}{B} \leq 1 \dots \dots (f\acute{o}rmula 19)$$

$$\frac{Df}{B} > 1 \dots \dots (f\acute{o}rmula 20)$$

$$Fqd = 1 + 2 * \tan(\Phi') * (1 - \text{sen}(\Phi'))^2 * \tan^{-1} \left(\frac{Df}{B} \right) \dots (f\acute{o}rmula 21)$$

$$Fcd = Fqd - \left(\frac{1 - Fqd}{Nc * \tan(\Phi')} \right) \dots \dots \dots (f\acute{o}rmula 22)$$

$$F\gamma d = 1 \dots \dots (f\acute{o}rmula 23)$$

Factores de inclinaci3n de la carga (Fci, Fqi, F\gamma i)

$$Fci = Fqi = \left(1 - \frac{\beta^\circ}{90^\circ} \right)^2 \dots \dots \dots (f\acute{o}rmula 24)$$

$$F\gamma i = \left(1 - \frac{\beta^\circ}{\Phi'} \right)^2 \dots \dots \dots (f\acute{o}rmula 25)$$

Donde:

β° : Inclinaci3n de la carga en la fundaci3n, respecto a la vertical.

Finalmente, el c3lculo de la carga 3ltima y carga admisible del suelo como menciona el Dr. Braja M. DAS en su libro “Principles of Foundation Engineering” se obtiene de la siguiente forma:

$$qu = C' * Nc * Fcs * Fcd * Fci + q * Nq * Fqs * Fqd * Fqi + \frac{1}{2} * \gamma * B * N\gamma * F\gamma * F\gamma d * F\gamma i \dots \dots \dots (f\acute{o}rmula 26)$$

Seg3n literatura para el c3lculo de la capacidad de carga admisible se debe utilizar un factor de seguridad (F.S) igual 3.

Normativa Peruana E.050 tambi3n indica un factor de seguridad igual a 3.

Donde la obtenci3n de la capacidad 3ltima de carga del suelo a cimentar se expresa de la siguiente forma:

$$Qadm = \left(\frac{qu}{F.S} \right) \dots \dots \dots (f\acute{o}rmula 27)$$

Donde:

qu: Carga 3ltima

F.S: Factor de seguridad

2.3.4 Capacidad portante del suelo en condici3n din3mica

El Dr. Braja M. Das y el Dr. G.V. Ramada en su libro “Principles of Soil Dynamics” mencionan lo siguiente:

La resistencia estática de las cimentaciones superficiales ha sido exhaustivamente investigada y documentada en la literatura. No obstante, es importante destacar que estas cimentaciones pueden estar expuestas a cargas dinámicas, ya sea en sentido vertical u horizontal.

Las cargas dinámicas verticales suelen ser producto de explosiones nucleares, mientras que las cargas dinámicas horizontales, en su mayoría, se originan por movimientos sísmicos.

Estas cargas pueden provocar deformaciones permanentes significativas en las cimentaciones superficiales e incluso en las de pilotes, lo que puede dar lugar a fallos durante eventos sísmicos.

Estos fallos, en general, se asocian con el fenómeno de la licuefacción, donde la resistencia efectiva del suelo saturado se reduce a cero. No obstante, es poco probable que la licuefacción sea la única causa, y parece que la disminución de la capacidad de carga desempeña un papel importante en los asentamientos sísmicos de estas fundaciones, como se señaló en el estudio de Richards, Elms y Budhu (1993).

A pesar de que existe una gran cantidad de información sobre la capacidad de carga dinámica disponible en la literatura, en su mayoría se basa en enfoques teóricos y no coincide con los datos observados en campo. Por lo tanto, la mayoría de estos estudios publicados aún no se han incorporado de manera efectiva en los procesos de diseño en la práctica.

Inicialmente como principal parámetro a considerar para el cálculo de la capacidad portante del suelo, sea en condición estática o dinámica es la carga efectiva al fondo de la cimentación según fórmula 28, la cual se expresa se la siguiente forma según el Dr. Braja M. Das y Dr. G.V. Ramada en su libro “Principles of Soil Dynamics”

$$q = \gamma * D_f \dots \dots \dots (fórmula 28)$$

Donde:

q: Carga efectiva

γ : Densidad del suelo de apoyo

D_f: Profundidad de cimentación

Considerando parámetros sísmicos el Dr. Braja M. Das y Dr. G.V. Ramada mencionan una condición crítica del suelo cuando el coeficiente de aceleración vertical debido a un sismo (K_v) es igual que 0, como se detalla a continuación:

$$\tan(\theta) = \frac{K_h}{(1 - K_v)} \dots \dots \dots (fórmula 29)$$

Alcanza un valor crítico sí; $Kv = 0$

Entonces, $\tan(\theta) = Kh^* \dots \dots \dots$ (fórmula 30)

Para, $Kh = \frac{2}{3} * amax * Fa \dots \dots \dots$ (fórmula 31)

Donde:

Kh: Coeficiente de aceleración horizontal debido a un sismo

Kv: Coeficiente de aceleración vertical debido a un sismo

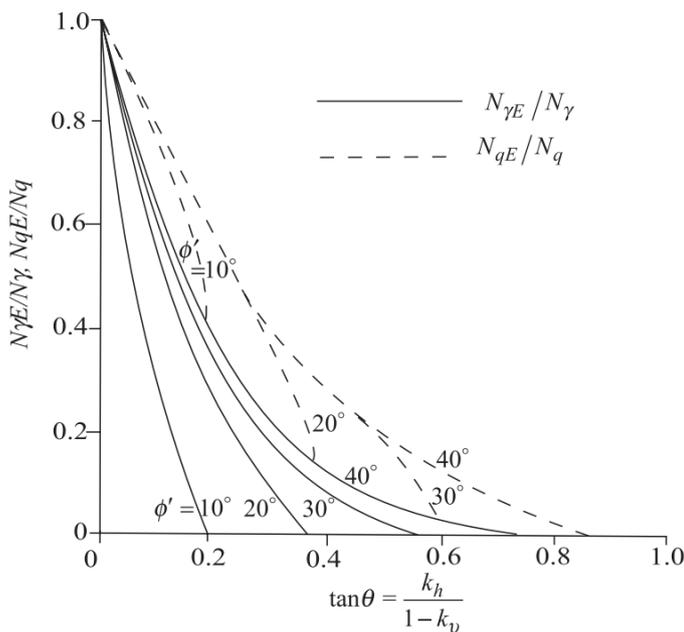
amax: Aceleración máxima del suelo

Fa: Factor de amplificación sísmica

Una vez obtenidos los resultados en base a parámetros sísmicos y conociendo los parámetros de resistencia del suelo, el Dr. Braja M. Das y Dr. G.V. Ramada en su libro “Principles of Soil Dynamics” dan la siguiente figura 4 donde se puede obtener los parámetros dinámicos de la capacidad de carga.

Figura 4

Variación de $N_{\gamma E} / N_{\gamma}$ y $N_{q E} / N_q$ con $\tan\theta$



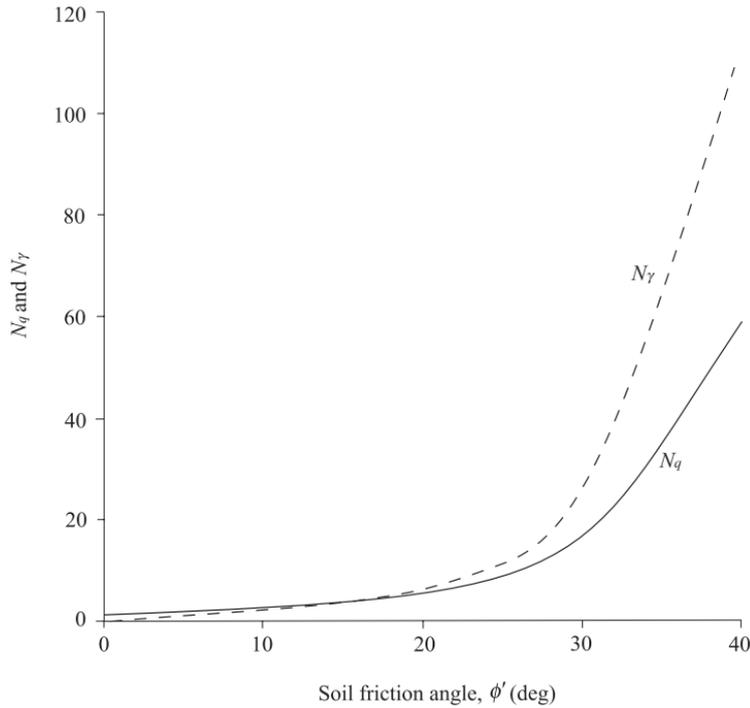
Nota. Tomado del libro Principles of Soil Dynamics (2011)

De igual forma en el libro “Principles of Soil Dynamics” mencionan 2 formas para obtener los parámetros estáticos de la capacidad de carga.

Primero, mediante la figurar 5 que está en función del ángulo de fricción de nuestro suelo de apoyo.

Figura 5

Variación de N_q y N_γ



Nota. Tomado del libro Principles of Soil Dynamics (2011)

Segundo, de manera analítica utilizando la siguiente tabla 3:

Tabla 3

Factores de Capacidad de Carga

ϕ (deg)	N_q	N_γ
0	1.0	0
10	2.4	1.4
20	5.9	6.4
30	16.5	23.8
40	59.0	112.0

Nota. Tomado del libro Principles of Soil Dynamics (2011)

Finalmente, el cálculo de la carga última y carga admisible dinámica del suelo como menciona el Dr. Braja M. DAS y Dr. G.V. Ramada en su libro “Principles of Soil Dynamics” se obtiene de la siguiente forma:

$$quE = q * NqE + \frac{1}{2} * \gamma * B * N\gamma E \dots \dots \dots (f\acute{o}rmula 32)$$

Donde:

q_{uE} : Carga última dinámica

q : Carga efectiva

N_{qE} , $N_{\gamma E}$: Factores de capacidad de carga dinámica

γ : Peso unitario del suelo

B : Ancho de la cimentación

Según literatura para el cálculo de la capacidad de carga admisible se debe utilizar un factor de seguridad (F.S) igual 3.

Normativa Peruana E.050 también indica un factor de seguridad igual a 3.

Donde la obtención de la capacidad última de carga del suelo a cimentar se expresa de la siguiente forma:

$$Q_{adm} = \left(\frac{q_u}{F.S} \right) \dots \dots \dots (f\acute{o}rmula 33)$$

Donde:

q_u : Carga última

F.S: Factor de seguridad

2.3.5 Soluciones geotécnicas

Las soluciones geotécnicas son técnicas o métodos utilizados en la ingeniería geotécnica para abordar problemas relacionados con el suelo y las estructuras construidas sobre él. Estas soluciones pueden incluir medidas de mejora del suelo, como compactación y refuerzo con geosintéticos (Zeybek & Madabhushi, 2017).

2.3.6 Columnas de grava

Las columnas de grava son elementos geotécnicos utilizados para mejorar la capacidad portante y reducir el riesgo de licuefacción en suelos potencialmente licuables. Se instalan mediante técnicas de vibrocompactación o inyección y aumentan la resistencia y drenabilidad del suelo (Ruiz Ortiz & Pineda Alcalá, 2022).

Las columnas de grava compactada ofrecen una solución innovadora y eficiente para mejorar las propiedades del suelo como la cohesión, ángulo de fricción y resistencia al corte, aumentando su resistencia y reduciendo la susceptibilidad a la licuefacción. La metodología y las fórmulas específicas para calcular estos parámetros han sido desarrolladas y presentadas en detalle por Flores et al. (2022) en su estudio titulado "Mitigación del riesgo de licuefacción en tanques de almacenamiento mediante Columnas de Grava Compactada".

A continuación, se presentan las fórmulas clave extraídas de este estudio, que sirven como base para la metodología propuesta en esta tesis:

$$C'_{comp} = C'_m * (1 - Ra) \dots \dots \dots (fórmula 34)$$

$$\phi'_{comp} = \arctan[Ra * \tan(\phi'_g) + (1 - Ra) * \tan(\phi'_m)] \dots \dots \dots (fórmula 35)$$

$$\tau_{comp} = \sigma'_v * \tan(\phi'_{comp}) + C'_{comp} \dots \dots \dots (fórmula 36)$$

Donde c'_m es la cohesión de la matriz de suelo, R_a es la relación entre el área de PAC y el área de la huella total de la zona de suelo mejorada, ϕ'_g es el ángulo de fricción de las PAC agregados y ϕ'_m es el ángulo de fricción de la matriz de suelo.

La capacidad portante de los suelos es un aspecto crítico en la ingeniería geotécnica, especialmente en áreas con suelos de baja capacidad portante. La implementación de columnas de grava ha emergido como una solución eficaz para mejorar la capacidad portante de estos suelos, permitiendo una cimentación más segura y estable en diversas aplicaciones, incluyendo edificaciones de salud.

En su tesis de pregrado, Ayasca Ilizarbe y Quispe Salvatierra (2022) exploraron el uso de geomallas y columnas de grava para mejorar la capacidad portante de suelos bajo cimentaciones superficiales. Su investigación proporciona una metodología detallada y una fórmula específica para calcular la capacidad portante mejorada mediante la implementación de la columna de grava. Esta metodología representa un avance significativo en la comprensión y aplicación de técnicas geotécnicas para suelos de baja capacidad portante.

La fórmula presentada por Ayasca Ilizarbe y Quispe Salvatierra (2022) es la siguiente:

$$q_u = \gamma_{comp} * B * N_\gamma + q * N_q + C'_{comp} * N \dots \dots \dots (fórmula 37)$$

$$Q_{adm} = q_u / F.S \dots \dots \dots (fórmula 38)$$

$$\gamma_{comp} = A_s * \gamma_s + (1 - A_s) * \gamma_c \dots \dots \dots (fórmula 39)$$

$$A_s = A_{col} / S^2 \dots \dots \dots (fórmula 40)$$

Donde:

A_{col} = sección transversal de la columna

S =espaciamiento entre columnas.

γ_s =peso unitario del suelo

γ_{comp} = peso unitario equivalente al sistema suelo columna

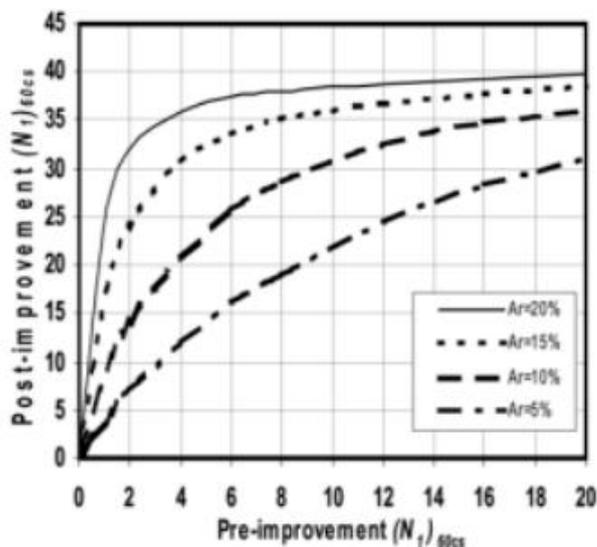
Para cuantificar la mejora del valor N de campo mediante esta técnica, es esencial considerar la relación entre las áreas de la columna y el suelo circundante. Esta relación es un indicador del grado de refuerzo proporcionado por la columna de grava al suelo.

En el presente estudio, se propone hallar el N de campo mejorado mediante un análisis gráfico. En este gráfico, se relacionará la relación de áreas de columna/suelo con el N inicial. A través de esta correlación, se podrá determinar el incremento en el valor de N debido a la presencia de la columna de grava.

La figura 6 presentada por Báez (1995) ilustra la comparativa entre los valores de golpeo SPT obtenidos en arenas limpias antes y después de aplicar un tratamiento específico.

Figura 6

Golpeo SPT Antes y Después del Tratamiento, en Arenas Limpias (Báez 1995)



Nota. Tomado de Carvajal Díaz, E., & Ruiz-Terán, P. (2019). Métodos de ejecución de columnas de grava y su influencia en el suelo mejorado.

2.3.7 Inyección de estabilizadores químicos

La inyección de estabilizadores químicos es una técnica utilizada en la ingeniería geotécnica para mejorar las propiedades del suelo. Consiste en la introducción de sustancias químicas estabilizadoras, como cal, en el suelo mediante inyecciones (Forcellini, 2020).

2.3.8 Presión de poros en suelos

La presión de poros en suelos se refiere a la presión ejercida por el agua contenida en los poros del suelo. Durante eventos sísmicos, la presión de poros puede aumentar y

contribuir a la licuefacción del suelo (Monforte, Gens, Arroyo, Mánica, & Carbonell, 2021).

2.3.9 Cimentaciones superficiales

Las cimentaciones superficiales son estructuras utilizadas para transmitir las cargas de una edificación al suelo de manera segura. Se apoyan directamente sobre la superficie del suelo y se diseñan teniendo en cuenta la capacidad portante del suelo y las cargas aplicadas (Farina Bravo & Huapaya Farfán, 2019).

2.3.10 Norma E050

El propósito de esta norma es establecer los requisitos mínimos para la realización de estudios de mecánica de suelos (EMS) durante la construcción de cimentaciones y otras obras especificadas en esta norma. El SGA se implementa para garantizar la estabilidad y sostenibilidad de las obras y promover el uso racional de los recursos.

Asegurar la continuidad de los servicios básicos y edificaciones importantes de acuerdo a la norma E.030, además de minimizar los daños al proyecto y edificaciones o caminos adyacentes.

2.4 Definición de términos básicos

Cimentaciones: Las cimentaciones son estructuras que transmiten las cargas de un edificio o estructura al suelo (Bautista Prada & Mayorga Murillo, 2018).

Cimentaciones superficiales: Las cimentaciones superficiales son aquellas que se apoyan en las capas superficiales o cercanas a la superficie del suelo (Bautista Prada & Mayorga Murillo, 2018).

Licuefacción de suelos: La licuefacción de suelos es un fenómeno que ocurre cuando un suelo saturado pierde su resistencia y se comporta como un líquido debido a la aplicación de cargas dinámicas, como las inducidas por un terremoto (Bautista Prada & Mayorga Murillo, 2018).

Soluciones geotécnicas: Las soluciones geotécnicas se refieren a las técnicas y métodos utilizados para mejorar las propiedades del suelo para la construcción de cimentaciones y otras estructuras (Ruiz Ortiz & Pineda Alcala, 2022).

Capacidad portante del suelo: La capacidad portante del suelo se refiere a la capacidad máxima de carga que el suelo puede soportar sin fallar o causar asentamientos inaceptables en la estructura que soporta (Ruiz Ortiz & Pineda Alcala, 2022).

Nivel freático: Se refiere a la ubicación de la superficie de agua subterránea en un área específica. En el documento, se menciona que el nivel freático se establece en la

superficie para cumplir con la condición de saturación experimental (Rivera Chura, 2020, p. 53).

Cohesión: La cohesión en el suelo se refiere a la capacidad de las partículas del suelo para adherirse entre sí (Rivera Chura, 2020).

Ángulo de fricción: El ángulo de fricción se refiere al ángulo interno de resistencia al corte de un material, en este caso, el suelo (Rivera Chura, 2020).

Poros presión: La poros presión se refiere a la presión del agua en los poros del suelo (Monforte, Gens, Arroyo, Mánica, & Carbonell, 2021).

Asentamiento diferencial: El asentamiento diferencial se refiere a la variación en el asentamiento vertical de diferentes partes de una estructura, lo que puede causar problemas estructurales (Rivera Chura, 2020).

2.5 Fundamentos teóricos que sustentan las hipótesis

En el Anexo 8.4 de la tesis de Falla Rufasto (2021), se presenta un análisis del potencial de licuefacción del suelo sin la implementación de columnas de grava. La tabla muestra los resultados de los análisis de licuefacción para diferentes zonas del área de estudio, incluyendo la Zona 2. Los resultados se presentan en términos de la relación de esfuerzo de corte cíclico (CSR) y la resistencia cíclica de resistencia (CRR) para diferentes niveles de profundidad del suelo. En la Zona 2, los factores de seguridad son menores a 1 en varias profundidades, lo que indica un alto potencial de licuefacción (Falla Rufasto, 2021).

Esto significa que, en caso de un evento sísmico, el suelo en la Zona 2 podría perder su resistencia y comportarse como un líquido, un fenómeno conocido como licuefacción. Este comportamiento puede tener consecuencias devastadoras para cualquier estructura construida sobre él, ya que la pérdida de resistencia del suelo puede provocar asentamientos y desplazamientos de las estructuras, e incluso su colapso. Por lo tanto, los hallazgos de Falla Rufasto (2021) subrayan la necesidad de implementar medidas de mitigación, como las columnas de grava, para mejorar la resistencia del suelo y reducir su potencial de licuefacción como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4

Potencial de Licuefacción sin Columna de Grava: Metodología Seed & Idriss (Falla Rufasto, 2021, Anexo 8.4)

	Espesor de estratos	Γ (tn/m ³)	Finos	N 60 spt	Efzo. Total (kgf/cm ²)	Esfzo. Eftvo (kg/cm ²)	Alfa	Beta	N1 spt Corregido (glp/ft)	Crr M = 7.5	Co	Pa	Ko	K-alfa	Crr V	Msf	Csr	Fct. Rduc. Rd	Crr M	Fsl	Potencial de Licuefacción	
0 00	0 0				0.00																	
6.3	6.3	2.05	4.4	6	1.29	0.66	0	1 00	6	0.08	0.08	101.33	1.04	1	0 08	0.89	0.63	0.96	0.07	0.12	LICUABLE	
7.3	1.0	1.82	13.9	7	1.47	0.74	0	1 04	8	0 10	0 09	101.33	1.03	1	0 10	0.89	0.63	0.94	0.09	0.14	LICUABLE	
9.3	2.0	1.82	9.7	9	1.84	0.91	0	1.02	10	0.11	0.09	101.33	1.01	1	0.11	0.89	0.62	0.90	0.10	0.16	LICUABLE	
10.3	1 0	1.82	31.6	8	2.02	0.99	0	1.17	10	0.11	0 09	101.33	1.00	1	0 11	0.89	0.61	0.88	0.10	0.17	LICUABLE	
11.3	1.0	1.82	56.	9	2.20	1 07	0	1 41	13	0.14	0.10	101.33	1 00	1	0.14	0.89	0.59	0.86	0.12	0.21	LICUABLE	
19.3	8.0	1.82	50.	9	3.66	1.73	0	1 34	13	0.14	0.10	101.33	0.95	1	0 13	0.89	0.46	0.65	0.12	0.26	LICUABLE	
20.3	1.0	1.82	50	1	3.84	1.81	0	1 34	14	0.15	0.11	101.33	0.94	1	0.14	0.89	0.45	0.62	0.13	0.28	LICUABLE	

Nota. Adaptado de Falla R. (2021)

En contraste, el Anexo 8.5 de la misma tesis presenta un análisis similar después de la implementación de las columnas de grava. En esta tabla, se puede observar que para la Zona 2, los factores de seguridad son mayores a 1 en casi todas las profundidades, lo que indica una reducción en el potencial de licuefacción (Falla Rufasto, 2021). Esto sugiere que la implementación de las columnas de grava ha mejorado los parámetros del suelo relevantes para la licuefacción en la Zona 2, lo que indica una mitigación exitosa de la licuefacción en esta zona según tabla 5.

Tabla 5

Cuadro de Potencial de Licuefacción Después de la Aplicación de las Columnas de Grava (Falla Rufasto, 2021, Anexo 8.5)

Profundidad total de estratos	Espesor de estratos	Γ (tn/m ³)	Finos	N 60 spt { glpf ft)	Efzo. Total (kgf/cm ²)	Esfzo. Eftvo (kg/cm ²)	Alfa	Beta	NI spt Corregido (glpf/ft)	C _{rr} M = 7.5	Co	Pa	Ko	K-alfa	C _{rr} V	Msf	C _{sr}	Fct. Rduc. Rd	C _{rr} M	Fsl	Potencial de Licuefacción	
0.00	0.0				0.00																	
6.3	6.3	2.05	4.4	32	1.29	0.66	0	1.00	32	0.73	0.22	101.33	1.10	1	0.81	0.89	0.63	0.96	0.72	1.13	no licuable	
7.3	1.0	1.82	13.9	31	1.47	0.74	0	1.04	33	1.24	0.24	101.33	1.08	1	1.34	0.89	0.63	0.94	0.19	1.88	no licuable	
9.3	2.0	1.82	9.7	31	1.84	0.91	0	1.02	32	0.73	0.22	101.33	1.03	1	0.75	0.89	0.62	0.90	0.67	1.09	no licuable	
10.3	1.0	1.82	31.6	27	2.02	0.99	0	1.17	32	0.73	0.22	101.33	1.01	1	0.74	0.89	0.61	0.88	0.66	1.08	no licuable	
11.3	1.0	1.82	56.	23	2.20	1.07	0	1.41	33	1.24	0.24	101.33	0.99	1	1.23	0.89	0.59	0.86	0.09	1.84	no licuable	
19.3	8.0	1.82	50.	23	3.66	1.73	0	1.34	31	0.56	0.21	101.33	0.89	1	0.50	0.89	0.46	0.65	0.44	1.02	no licuable	
20.3	1.0	1.82	50	24	3.84	1.81	0	1.34	33	1.24	0.24	101.33	0.87	1	1.08	0.89	0.45	0.62	0.96	2.14	no licuable	

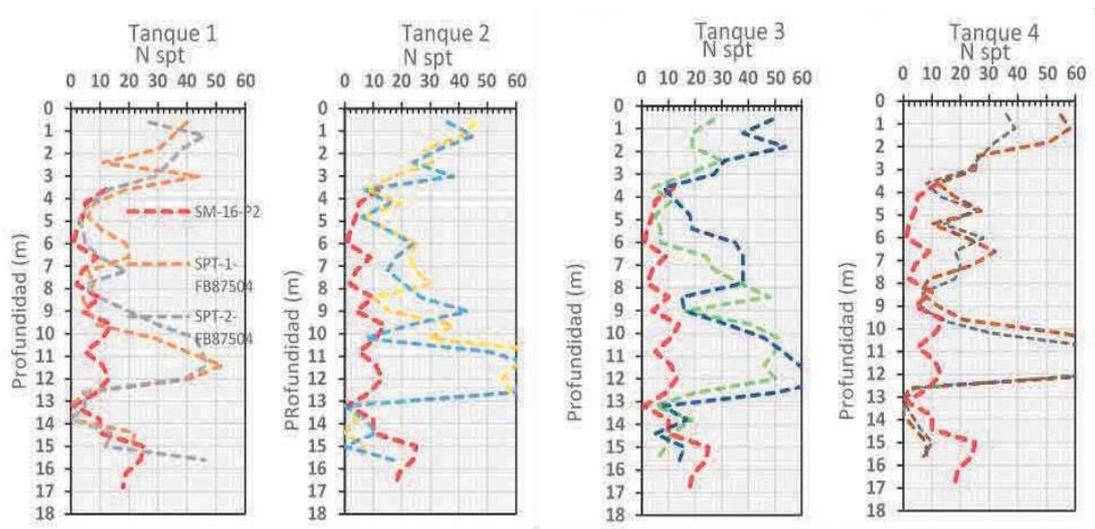
Nota. Adaptado de Falla R.(2021)

En el estudio "Mitigación del riesgo de licuefacción en tanques de almacenamiento mediante Columnas de Grava Compactada" realizado por Flores et al. (2022), se llevó a cabo una intervención para mejorar las condiciones del suelo en cuatro tanques de almacenamiento en la Refinería Dos Bocas, en Tabasco, México. La técnica utilizada fue la implementación de Columnas de Grava Compactada, también conocidas como Pilas de Agregado Compactado (PAC).

Los autores realizaron pruebas de penetración estándar (SPT) antes y después de la aplicación de las columnas de grava. Los resultados, que se muestran en la Figura 7, indican un incremento significativo en los números de golpes del SPT en los cuatro sitios después de la implementación del mejoramiento (Flores et al., 2022). Según los autores, "Las líneas punteadas en color rojo corresponden a los SPT antes del mejoramiento. Las demás líneas punteadas a los SPT después del mejoramiento" (Flores et al., 2022, p. 6). Estos resultados sugieren que la implementación de las Columnas de Grava Compactada puede ser una estrategia efectiva para mejorar las condiciones del suelo y reducir el riesgo de licuefacción en áreas con tanques de almacenamiento.

Figura 7

Registros de SPT en los Cuatro Tanques, Antes y Después del Mejoramiento (Flores et al., 2022, p. 6)



Nota. Estas figuras se tomaron de "Mitigación del riesgo de licuefacción en tanques de almacenamiento mediante Columnas de Grava Compactada" (Flores et al., 2022, p. 6).

En el estudio "Método de inyección mortero para mejorar suelos potencialmente licuables" realizado por Fernandez Silva y Vasquez Diaz (2022), se propone una intervención para mejorar las condiciones del suelo en Santa Rosa, Lambayeque. La técnica utilizada fue la implementación de un método de inyección de mortero en suelos arenosos.

Los autores realizaron pruebas de penetración estándar (SPT) antes y después de la aplicación del método de inyección de mortero. Según los autores, "Las pruebas posteriores al mejoramiento del terreno indican que se reduce el nivel de riesgo del terreno obteniéndose un incremento de la resistencia a la penetración dinámica desde 30 a 90%, que se traduce en términos de incrementos de resistencia cíclica CRR hasta en tres veces la resistencia cíclica inicial del terreno, con respecto al tipo de suelo, hasta en 4 veces con respecto a la profundidad de la inyección" (Fernandez Silva & Vasquez Diaz, 2022, p. 243).

Estos resultados según tabla 6 sugieren que la implementación del método de inyección de mortero puede ser una estrategia efectiva para mejorar las condiciones del suelo y reducir el riesgo de licuefacción en áreas potencialmente licuables.

Tabla 6

Resistencia Dinámica de los Suelos Mejorados, Prueba SPT 17

Prof.(m)	Tipo de suelo	Número de golpes Nm SPT			
		Sin tratamiento	Con inyección	Mejora Nm SPT	Mejora (%)
1.50	SP	7	13.00	6.00	85.71
1.95	SP	11	21.00	10.00	90.91
2.40	SP	13	24.00	11.00	84.62
2.85	SC	18	32.00	14.00	77.78
3.30	SC	20	33.00	13.00	65.00
3.75	SC	25	36.00	11.00	44.00
4.20	SC	20	33.00	8.00	32.00
4.65	SC	35	43.00	8 00	22.86
5.10	SC	62	69.00	7.00	11.29
5.55	SC	78	80.00	2.00	2.56
6.00	SC	79	81.00	2.00	2.53

Nota. Esta figura se tomó de la tabla en "Método de inyección mortero para mejorar suelos potencialmente licuables" (Fernandez Silva & Vasquez Diaz, 2022, p. 243).

Además, los autores presentan una tabla titulada "Evaluación del índice potencial de daños inducidos en la superficie del perfil de terreno mejorado, pruebas SPT (12,13)" (Fernandez Silva & Vasquez Diaz, 2022, p. 248). Esta tabla 7 muestra la reducción del nivel de riesgo y la profundidad de riesgo del perfil a considerar en los efectos de 3.00 a 2.00 m después de la inyección de mortero.

Tabla 7

Evaluación del Índice Potencial de Daños Inducidos en la Superficie del Perfil de Terreno Mejorado, Pruebas SPT (12,13) (Fernandez Silva & Vasquez Diaz, 2022, p. 248)

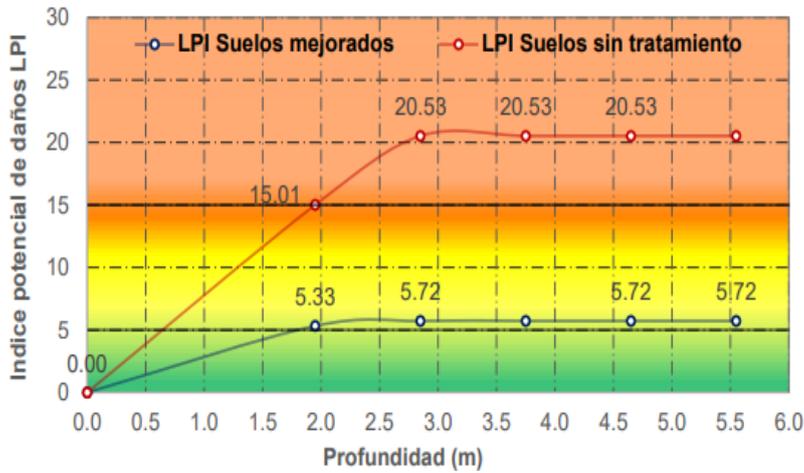
Z (m)	FL z	ls	li	F(z) 1- FLz	W(z)	LPI(1)=W z*f(z)*(ls- li)	LPI (1) cum	LPI (2) cum	Mejora LP(1) LP(2)	Efecto en superficie
0.00	0.18	0.00	0.00	0.82	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
1.95	0.70	1.95	0.00	0.30	9.03	5.33	5.33	115.01	35.49	Si
2.85	0.95	2.85	1.95	0.05	9.55	0.39	5.72	20.53	27.87	No
3.75	3.97	3.75	2.85	0.00	9.55	0.00	5.72	20.53	27.87	No
4.65	3.74	4.65	3.75	0.00	9.55	0.00	5.72	20.53	27.87	No
5.55	3.60	5.55	4.65	0.00	9.55	0.00	5.72	20.53	27.87	No

Nota. Esta figura se tomó de la tabla en "Método de inyección mortero para mejorar suelos potencialmente licuables" (Fernandez Silva & Vasquez Diaz, 2022, p. 248).

Estos resultados sugieren que la implementación del método de inyección de mortero puede ser una estrategia efectiva para mejorar las condiciones del suelo y reducir el riesgo de licuefacción en áreas potencialmente licuables como se visualiza en la figura 8.

Figura 8

Evaluación del Nivel de Riesgo Inducido en la Superficie del Terreno Mejorado, a partir de Sondajes SPT (12,13)



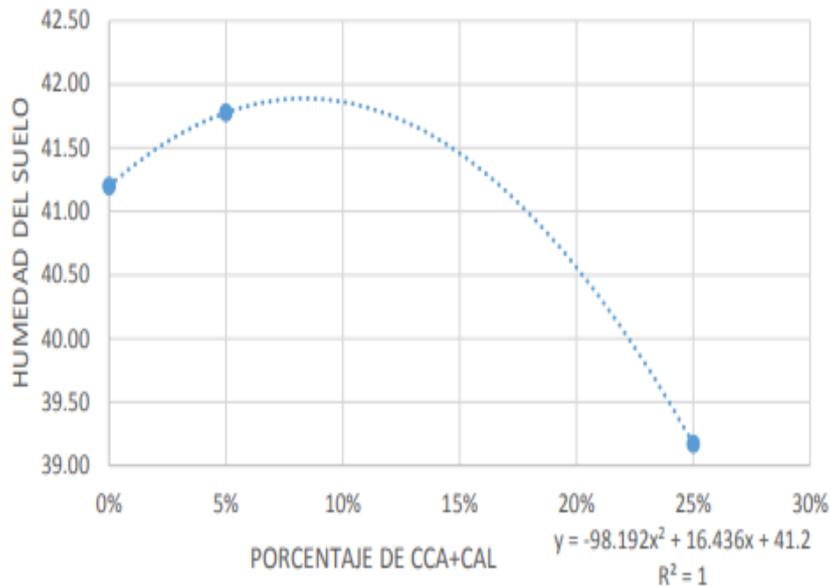
Nota. Esta figura se tomó de "Método de inyección mortero para mejorar suelos potencialmente licuables" (Fernandez Silva & Vasquez Diaz, 2022, p. 248).

En la tesis "Variación de las propiedades fisicoquímicas de los suelos del depósito lacustre de la ciudad de Tunja, zona Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia" realizada por Velandia Rativa (2019), se investigó la influencia de la humedad en las propiedades de los suelos. La autora realizó un análisis detallado de la variación de la humedad con el porcentaje de silicato de calcio.

La Figura 9 que se muestra a continuación, presenta los resultados de este análisis. Según Velandia Rativa (2019), la humedad del suelo disminuye a medida que aumenta el porcentaje de silicato de calcio. Este hallazgo sugiere que la humedad del suelo puede ser influenciada por la composición química del suelo, lo que puede tener implicaciones significativas para la licuefacción del suelo.

Figura 9.

Variación de la Humedad con el Porcentaje de Silicato de Calcio (Velandia Rativa, 2019, p. 78)



Nota. Esta Figura se tomó de "Variación de las propiedades fisicoquímicas de los suelos del depósito lacustre de la ciudad de Tunja, zona Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia" (Velandia Rativa, 2019, p. 78).

Es importante mencionar que, aunque la resistencia cíclica del suelo y el N60 son factores críticos en la licuefacción del suelo, otros factores como la humedad y la composición química del suelo también pueden jugar un papel importante. Este estudio proporciona evidencia de que la humedad del suelo puede ser un factor a considerar en la evaluación del riesgo de licuefacción.

La reducción de la humedad del suelo es una estrategia comúnmente utilizada para mitigar el riesgo de licuefacción. Por ejemplo, las técnicas de drenaje pueden utilizarse para reducir la humedad del suelo y, por lo tanto, reducir su susceptibilidad a la licuefacción. Por último, dado que nuestro estudio se centra en la mejora de los suelos para reducir el riesgo de licuefacción, es importante considerar todos los factores que pueden influir en la licuefacción, incluyendo la humedad del suelo. Por lo tanto, la inclusión de una imagen que muestra cómo cambia la humedad del suelo es relevante y valiosa para el estudio.

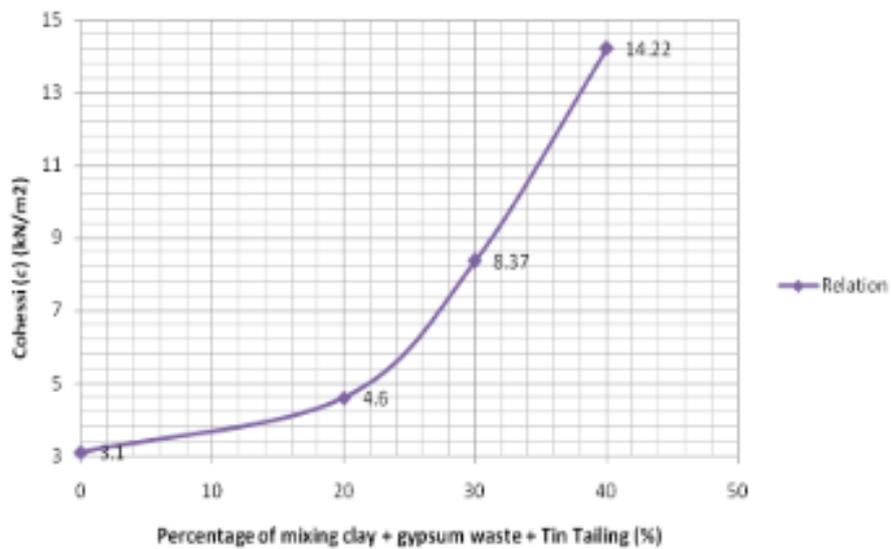
En el artículo "Use of Gypsum Waste and Tin Tailings as Stabilization Materials for Clay to Improve Quality of Subgrade" (Apriyanti et al., 2019), se exploró el uso de residuos de yeso y relaves de estaño para mejorar la estabilidad del suelo arcilloso. Los autores llevaron a cabo diversas pruebas, incluyendo análisis por tamizado, pruebas de límites de

consistencia y ensayos de resistencia al corte, para evaluar los efectos de estos materiales de estabilización.

Al analizar los resultados de la prueba de resistencia al corte directo, se observó un aumento en los valores de cohesión (c) y ángulo de corte (ϕ) a medida que se incrementaba el porcentaje de relaves de estaño, como se muestra en las Figuras 10 y 11.

Figura 10

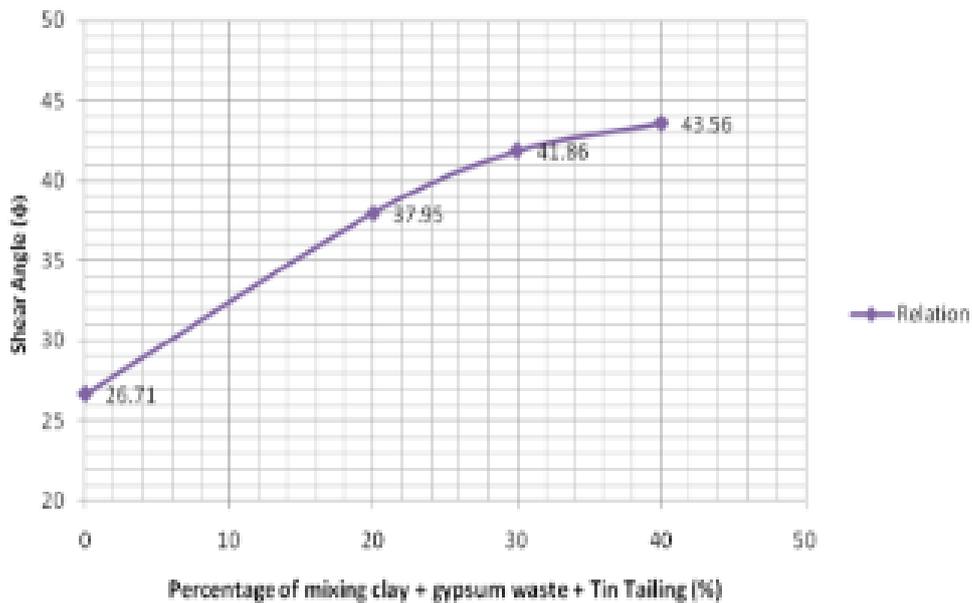
Mejora en la Cohesión al Corte del Suelo Arcilloso con la Adición de Residuos de Yeso y Relaves de Estaño (Apriyanti et al., 2019, p. 3)



Nota. Esta figura se tomó de "Use of Gypsum Waste and Tin Tailings as Stabilization Materials for Clay to Improve Quality of Subgrade" (Apriyanti et al., 2019, p. 3).

Figura 11

Mejora en el ángulo de fricción al Corte del Suelo Arcilloso con la Adición de Residuos de Yeso y Relaves de Estaño (Apriyanti et al., 2019, p. 3)



Nota. Esta figura se tomó de "Use of Gypsum Waste and Tin Tailings as Stabilization Materials for Clay to Improve Quality of Subgrade" (Apriyanti et al., 2019, p. 3).

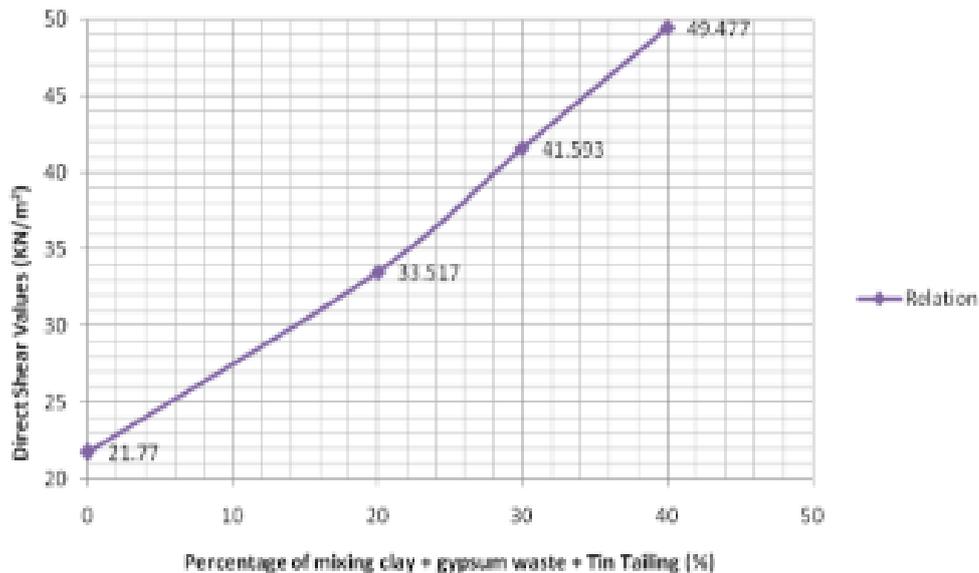
La resistencia al corte del suelo se determina mediante los valores de cohesión (c) y ángulo de corte (ϕ). Este incremento en la resistencia al corte se refleja en la Figura 4. Inicialmente, la resistencia al corte de la arcilla original fue de 21.77 KN / m². No obstante, tras añadir un 8% de yeso y variaciones en los relaves de estaño del 20%, 30% y 40%, la resistencia al corte experimentó un aumento considerable, con valores de 33.517 KN / m², 41.593 KN / m² y 49.447 KN / m². La combinación de un 8% de yeso y un 40% de relaves de estaño resultó en el valor máximo de resistencia al corte. Este aumento puede atribuirse a las propiedades de grano grueso de los relaves de estaño, que provocan cambios en la gradación de las partículas de arcilla. Además, el contenido de calcio en los desechos de yeso actúa como aglutinante, otorgando mayor rigidez al suelo. En conjunto, estos factores contribuyen al incremento en los valores de cohesión y ángulo de corte, lo que a su vez lleva a un aumento en la resistencia al corte del suelo.

La Figura 12 en el artículo presenta los resultados de las pruebas de resistencia al corte antes y después de la adición de residuos de yeso y relaves de estaño. Según Apriyanti et al. (2019), se observa un aumento significativo en la resistencia al corte del suelo arcilloso después de la adición de estos materiales. Este hallazgo sugiere que la combinación de

residuos de yeso y relaves de estaño puede mejorar la resistencia del suelo y, por lo tanto, la calidad del subgrado.

Figura 12

Mejora en la Resistencia al Corte del Suelo Arcilloso con la Adición de Residuos de Yeso y Relaves de Estaño (Apriyanti et al., 2019, p. 4)



Nota. Esta Figura se tomó de "Use of Gypsum Waste and Tin Tailings as Stabilization Materials for Clay to Improve Quality of Subgrade" (Apriyanti et al., 2019, p. 4).

Este estudio subraya la relevancia de considerar el uso de materiales de estabilización en la mejora de la calidad del subgrado y la resistencia del suelo arcilloso. La información proporcionada por Apriyanti et al. (2019) puede ser valiosa para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en ingeniería geotécnica y construcción.

La siguiente tabla 8 presenta los resultados de las pruebas de mejora de la cohesión, el ángulo de fricción y la resistencia al corte del suelo arcilloso después de la adición de relaves y yeso. Las mejoras se expresan en términos de porcentaje en relación con las condiciones iniciales del suelo. Estos datos han sido recopilados y organizados para proporcionar una representación visual clara de los efectos de la incorporación de materiales de estabilización en la calidad del suelo.

Tabla 8*Mejora de las Propiedades del Suelo Arcilloso con la Adición de Relaves y Yeso*

Prueba	Cohesión (c) (KN/m ²)	Ángulo		Resistencia al Corte (KN/m ²)	Mejora Cohesión (%)	Mejora Ángulo (%)	Mejora Resistenc ia (%)
		de Fricción (φ) (grados)					
Antes	3.1	26.71		21.77	-	-	-
Después (20%)	4.6	37.95		33.517	48.39%	42.08%	53.96%
Después (30%)	8.37	41.86		41.593	170.00%	56.72%	91.06%
Después (40%)	14.22	43.56		49.447	358.71%	63.08%	127.13%

Nota. Elaboración propia basada en datos que se tomaron de "Use of Gypsum Waste and Tin Tailings as Stabilization Materials for Clay to Improve Quality of Subgrade" (Apriyanti et al., 2019, p. 4).

En el marco de esta investigación, se realizó un análisis detallado de las propiedades del suelo arcilloso mediante pruebas de resistencia al corte, con el objetivo de evaluar los efectos de la incorporación de relaves y yeso en la estabilidad del suelo. Los resultados se presentan en la Tabla 3, donde se observa una notable mejora en la cohesión, el ángulo de fricción y la resistencia al corte después de la adición de estos materiales. En particular, se destaca el incremento significativo en los valores de cohesión y ángulo de fricción, lo cual se traduce en una mejora sustancial en la resistencia al corte del suelo. Estos hallazgos respaldan la hipótesis planteada en esta investigación, que sugiere que la incorporación de relaves y yeso puede efectivamente mejorar la calidad y estabilidad del sublecho.

CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS

3.1 Hipótesis

3.1.1 *Hipótesis general*

Al Comparar las soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables se define una óptima solución geotécnica la cual mejora el comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales

3.1.2 *Hipótesis específicas*

a) Al analizar las soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables empleando columnas de grava como método de mejora del suelo se mejora el comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales

b) Al analizar las soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables empleando técnicas de inyección de estabilizadores químicos se mejora el comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales

3.2 Variables

3.2.1 *Definición conceptual y operacional*

3.2.1.1 Variable dependiente

Comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales.

3.2.1.2 Variable independiente

Soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables.

3.2.1.3 Definición de la variable dependiente

Comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales: se medirá la capacidad portante, el asentamiento, la deformación y la estabilidad de las cimentaciones superficiales después de la aplicación de las soluciones geotécnicas. Estos parámetros se medirán de acuerdo a las normativas y métodos detallados en las publicaciones científicas y tesis de investigación.

3.2.1.4 Definición de la variable independiente

Soluciones geotécnicas: se determinará el tipo de solución geotécnica aplicada (columnas de grava o inyección de estabilizadores químicos), así como los parámetros de aplicación (profundidad, tiempo de implementación, etc.) basándose en la recopilación de ensayos de tesis y artículos de diversos autores.

3.2.2 Operacionalización de las variables

OPERACIONALIZACION DE LAS VARIABLES										
Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Índices	Unidad de Medida	Escala	Instrumento	Herramientas	Ítems
Soluciones Geotécnicas	Técnicas y métodos para mejorar el comportamiento mecánico de suelos potencialmente licuables en cimentaciones superficiales	Implementación de técnicas específicas de mejoramiento del suelo en un sitio seleccionado	Columna de grava	Resistencia al corte, densidad, porosidad, permeabilidad, deformación, asentamiento	Esfuerzos máximos, vacíos, estabilidad	kg/cm ²	Cuantitativo	Observación directa, pruebas de laboratorio, ensayos in situ	Penetrómetro, sismógrafo, piezómetro, equipo de compactación, equipo de perforación	Técnica utilizada (nominal), cantidad de material utilizado (razón), profundidad de aplicación (intervalo), tiempo de implementación (intervalo)
		Tipo de técnica utilizada se refiere a la elección de uno o varios métodos de mejoramiento del suelo para aumentar su capacidad de soporte y disminuir su susceptibilidad a la licuefacción.	Técnica de inyección de estabilizadores químicos	Resistencia al corte, densidad, porosidad, permeabilidad, deformación, asentamiento, estabilidad	Índice de plasticidad, índice de consistencia, relación de vacíos	Unidad/unidad	Adimensional	Adición de mortero	Penetrómetro, sismógrafo, piezómetro, equipo de compactación, equipo de perforación	Técnica utilizada (nominal), cantidad de material utilizado (razón)
Comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales	Se refiere a cómo las cimentaciones superficiales responden a las cargas y al entorno, especialmente en suelos potencialmente licuables	Evaluación de la respuesta de las cimentaciones superficiales a las cargas y al entorno después de la aplicación de soluciones geotécnicas	Capacidad portante	Resistencia al corte, asentamiento, deformación, estabilidad	Esfuerzos máximos, deformaciones, asentamientos	kg/cm ² , mm	Cuantitativo	Observación directa, pruebas de laboratorio, ensayos in situ	Penetrómetro, sismógrafo, piezómetro, equipo de compactación, equipo de perforación	Capacidad portante (razón)
		La deformación se refiere a los cambios en la forma o tamaño de la cimentación superficial debido a las cargas o al entorno.	Deformación	Deformación elástica, deformación plástica	Deformaciones	mm	Cuantitativo	Observación directa, pruebas de laboratorio, ensayos in situ	Penetrómetro, sismógrafo, piezómetro, equipo de compactación, equipo de perforación	Deformación elástica (intervalo), deformación plástica (intervalo)
		La resistencia al corte de un suelo se refiere a la capacidad máxima de un suelo para resistir fuerzas de corte sin fallar o deslizarse.	Resistencia al corte	Factor de seguridad contra la falla, resistencia al corte residual	Factores de seguridad, resistencias residuales	Adimensional, kg/cm ²	Cuantitativo	Observación directa, pruebas de laboratorio, ensayos in situ	Penetrómetro, sismógrafo, piezómetro, medidor de asentamiento, equipo de compactación, equipo de perforación	Factor de seguridad contra la falla (razón), resistencia al corte residual (razón)

CAPÍTULO IV: MARCO METODOLÓGICO

4.1 Método de la investigación

4.1.1 Método

El método de la investigación será cuantitativo ya que se reunirán datos numéricos que pueden ser jerarquizados, medidos o categorizados a través de análisis estadísticos y ayudará a descubrir patrones y relaciones, así como a realizar generalizaciones.

4.1.2 Orientación

La orientación de nuestra investigación es aplicada, ya que partiendo de investigaciones anteriores buscamos comparar y encontrar que solución geotécnica da mejores resultados a un suelo potencialmente licuable y a su vez como mejora su capacidad portante en Talara – Piura – Perú.

4.1.3 Enfoque

El enfoque de investigación es cuantitativo ya que se basa en la recopilación de información de tesis, artículos científicos, así como la toma de datos para posteriormente procesarlos mediante cálculos manuales y verificar el potencial de licuefacción y capacidad portante del suelo al aplicar columnas de grava e inyección de estabilizadores químicos

4.1.4 Instrumento de recolección de datos

La documentación que se utilizará es válida de contenido ya que la información será basada en las normas y métodos que rigen las soluciones geotécnicas y su impacto en el comportamiento mecánico de las cimentaciones superficiales. Estas normas y métodos están aprobados por el juicio de expertos en la materia.

Los resultados de los ensayos de los documentos utilizados serán fiables debido a que pertenecerán a fuentes verídicas de diferentes bases de datos del ámbito académico y científico.

4.2 Tipo de investigación

Esta investigación será de tipo descriptivo y correlacional. Como investigación descriptiva, buscará especificar las propiedades, características y comportamientos de suelos potencialmente licuables y las soluciones geotécnicas aplicadas para mejorar su comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales. Como investigación correlacional, se analizará la relación entre las soluciones geotécnicas aplicadas y el comportamiento resultante de las cimentaciones superficiales.

Aunque se utilizarán datos de estudios experimentales previos, esta investigación no será experimental en sí misma, ya que no se manipularán variables ni se realizarán experimentos. En lugar de eso, se recogerán y analizarán datos existentes para describir y analizar las relaciones entre las variables de interés.

4.3 Nivel de la investigación

El nivel de la investigación será descriptivo porque buscará especificar las propiedades, características y comportamientos de suelos potencialmente licuables y las soluciones geotécnicas aplicadas para mejorar su comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales.

4.4 Diseño de la investigación

Es no experimental, retrospectivo ya que usaremos datos recolectados con anterioridad que serán utilizarlos para poner a prueba las conjeturas; y transversal ya que los datos recopilados son tomados en un tiempo específico.

4.5 Población y muestra

4.5.1 Población

La población o universo de la investigación se basará en todas las normas utilizadas en las publicaciones científicas y tesis de investigación sobre soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables y su impacto en el comportamiento mecánico de las cimentaciones superficiales.

4.5.2 Muestra

De acuerdo con lo descrito en la población, en esta investigación se establecerá como muestra el análisis de resultados de la aplicación de soluciones geotécnicas en suelos potencialmente licuables y su impacto en el comportamiento mecánico de las cimentaciones superficiales, de acuerdo con lo que especifican las normativas y estudios detallados en las publicaciones científicas y tesis de investigación.

4.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

4.6.1 Instrumentos de recolección de datos

La documentación que se utilizará es válida de contenido ya que la información será basada en las normas y métodos que rigen las soluciones geotécnicas y su impacto en el comportamiento mecánico de las cimentaciones superficiales. Estas normas y métodos están aprobados por el juicio de expertos en la materia.

Los resultados de los ensayos de los documentos utilizados serán fiables debido a que pertenecerán a fuentes verídicas de diferentes bases de datos del ámbito académico y científico.

4.6.2 Métodos y técnicas

El método de la investigación será cuantitativo ya que se reunirán datos numéricos que pueden ser jerarquizados, medidos o categorizados a través de análisis estadísticos y ayudará a descubrir patrones y relaciones, así como a realizar generalizaciones.

La técnica para el desarrollo de esta tesis será de análisis documental ya que se revisará, analizará y expondrá los resultados obtenidos en los ensayos de capacidad portante, asentamiento, deformación y estabilidad en las publicaciones científicas y tesis de investigación.

4.7 Descripción de la recolección de datos

La recolección de datos se realizará como observación indirecta ya que se utilizarán los resultados de los ensayos para las soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables y su impacto en el comportamiento mecánico de las cimentaciones superficiales, tomados de las publicaciones científicas y tesis de investigación encontradas en diferentes plataformas de datos académicos.

Se recolectará la data de los diferentes ensayos de las propiedades y comportamientos de suelos potencialmente licuables, así como los detalles de las soluciones geotécnicas aplicadas (columnas de grava o inyección de estabilizadores químicos, profundidad de aplicación, tiempo de implementación, etc.).

La herramienta que se utilizará para el procesamiento de datos y su posterior análisis será el software Microsoft Excel 2016 con el cual se elaborará un cuadro comparativo y gráficos para mostrar los resultados de la información bibliográfica recolectada.

CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

5.1 Licuefacción del Suelo (Sin solución geotécnica)

Parámetros iniciales para los cálculos respectivos, según Anexo C.

$$\varphi = 32.60^\circ$$

$$C = 0.10 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\gamma_1 = 1.70 \text{ Ton/m}^3$$

$$\gamma_2 = 1.75 \text{ Ton/m}^3$$

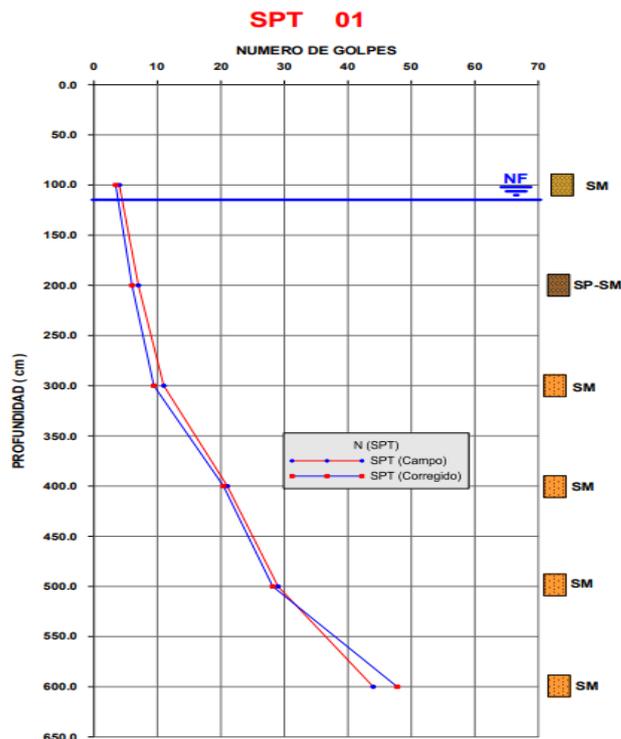
$$D_f = 2.00 \text{ m}$$

$$B = 1.50 \text{ m}$$

Se tendrá en cuenta los datos del ensayo SPT del estudio de mecánica de suelos según figura 13.

Figura 13

Resultados del Ensayo SPT



Nota. Los datos se tomaron del estudio de mecánica de suelos “Servicio de consultoría para la supervisión del servicio de ingeniería, suministro y construcción de tanques para almacenamiento de Diesel en refinería Talara.”

Tabla 9

Valores Ncampo del Ensayo SPT

Prof (m)	Ncampo
1.0	4
1.5	5
2.0	7
3.0	11
4.0	21
5.0	29
6.0	44

Nota. Los datos se tomaron del estudio de mecánica de suelos “Servicio de consultoría para la supervisión del servicio de ingeniería, suministro y construcción de tanques para almacenamiento de Diesel en refinería Talara.”

Datos sísmicos.

Magnitud de momento = 6.5°

amax = 0.45g

Primero se realizó el cálculo de la relación de esfuerzos (CN) según la fórmula 2 y 3, a diferentes profundidades.

1.00 m

$$\sigma_v = 1.7 \quad \text{T/m}^2$$

$$\mu = 0 \quad \text{T/m}^2 \quad \text{CN} = 1.70$$

$$\sigma'_v = 1.7 \quad \text{T/m}^2$$

1.50 m

$$\sigma_v = 2.55 \quad \text{T/m}^2$$

$$\mu = 0 \quad \text{T/m}^2 \quad \text{CN} = 1.70$$

$$\sigma'_v = 2.55 \quad \text{T/m}^2$$

2.00 m

$$\sigma_v = 3.425 \quad \text{T/m}^2$$

$$\mu = 0.5 \quad \text{T/m}^2 \quad \text{CN} = 1.70$$

$$\sigma'_v = 2.925 \quad \text{T/m}^2$$

3.00 m

$$\sigma_v = 5.175 \text{ T/m}^2$$

$$\mu = 1.5 \text{ T/m}^2 \quad \text{CN} = 1.65$$

$$\sigma'_v = 3.675 \text{ T/m}^2$$

4.00 m

$$\sigma_v = 6.925 \text{ T/m}^2$$

$$\mu = 2.5 \text{ T/m}^2 \quad \text{CN} = 1.50$$

$$\sigma'_v = 4.425 \text{ T/m}^2$$

5.00 m

$$\sigma_v = 8.675 \text{ T/m}^2$$

$$\mu = 3.5 \text{ T/m}^2 \quad \text{CN} = 1.39$$

$$\sigma'_v = 5.175 \text{ T/m}^2$$

6.00 m

$$\sigma_v = 10.425 \text{ T/m}^2$$

$$\mu = 4.5 \text{ T/m}^2 \quad \text{CN} = 1.30$$

$$\sigma'_v = 5.925 \text{ T/m}^2$$

Una vez calculada la relación de esfuerzos para diferentes profundidades, se identificaron los factores de corrección según la tabla 1 y se procedió a calcular los valores de N70 y N60 según la fórmula 4 y 5.

Tabla 10.

Cálculo de los Valores N70 y N60

Profundidad (m)	N	CN	n1	n2	n3	n4	N70	N60
1.0	4	1.70	0.64	0.75	1.00	1.15	3.8	4.4
1.5	5	1.70	0.64	0.75	1.00	1.15	4.7	5.5
2.0	7	1.70	0.64	0.75	1.00	1.15	6.6	7.7
3.0	11	1.65	0.64	0.75	1.00	1.15	10.0	11.7
4.0	21	1.50	0.64	0.85	1.00	1.15	19.7	23.0
5.0	29	1.39	0.64	0.85	1.00	1.15	25.2	29.4
6.0	44	1.30	0.64	0.95	1.00	1.15	40.0	46.6

Nota. Elaboración propia

En base a los resultados obtenidos anteriormente se pudo encontrar la relación de esfuerzos cíclicos ($tl/\sigma'v$) según la figura 2 y tabla 2, también el esfuerzo de corte promedio inducido por el terremoto ($td/\sigma'v$) según la fórmula 6 y la fórmula 1.

Tabla 11.

Cálculo de la Relación de Esfuerzos Cíclicos ($tl/\sigma'v$) y Relación de Esfuerzos de Corte Debido al Sismo ($td/\sigma'v$)

$tl/\sigma'v$	$m = 6.50$	$tl/\sigma'v$	$td/\sigma'v$
0.040	1.193	0.048	0.288
0.052	1.193	0.062	0.286
0.080	1.193	0.095	0.332
0.145	1.193	0.173	0.393
0.275	1.193	0.328	0.430
0.390	1.193	0.465	0.454
0.500	1.193	0.597	0.468

Nota. Elaboración propia

Finalmente se obtuvo el factor de licuefacción según la fórmula 7 para las diferentes profundidades.

Tabla 12.

Cálculo del Factor de Licuefacción

Profundidad (m)	F.L	Suelo	Condición
1.0	0.17	SM	LICUA
1.5	0.22	SM	LICUA
2.0	0.29	SP-SM	LICUA
3.0	0.44	SM	LICUA
4.0	0.76	SM	LICUA
5.0	1.03	SM	NO LICUA
6.0	1.27	SM	NO LICUA

Nota. Elaboración propia

5.2 Capacidad portante estática (Sin solución geotécnica)

Parámetros iniciales para los cálculos respectivos según EMS.

$$\phi = 32.60^\circ$$

$$C = 0.10 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\gamma_1 = 1.70 \text{ Ton/m}^3$$

$$\gamma_2 = 1.75 \text{ Ton/m}^3$$

$$D_f = 2.00 \text{ m}$$

$$B = 1.50 \text{ m}$$

Primero se realizó la corrección de la carga efectiva en el fondo de la cimentación considerando las condiciones mencionadas en la figura 3, fórmula 8 y fórmula 9.

Donde se cumple la siguiente condición:

$$\text{verificación: } 0 \leq D_1 \leq D_f$$

$$0 \leq 1.50 \leq 2$$

Obteniendo los siguientes valores:

$$q = 2.93 \text{ Ton/m}^2$$

$$\gamma' = 0.75 \text{ Ton/m}^3$$

Donde:

q: Carga efectiva al fondo de la cimentación

γ' : Peso unitario efectivo del suelo

Considerando una condición de falla localizada según la fórmula 11 y la fórmula 12, se precedió al cálculo de los parámetros de resistencia reducidos.

$$\phi' = 23.09^\circ$$

$$C' = 0.07 \text{ Ton/m}^2$$

Una vez obtenidos los parámetros de resistencia reducidos, se pudo realizar el cálculo de los diferentes factores de corrección por capacidad de carga, forma, profundidad e inclinación.

Primero se realizó el cálculo de los factores de capacidad de carga (N_c , N_q , N_γ)

$$N_q = 8.74 \text{ (según la fórmula 13)}$$

$$N_c = 18.16 \text{ (según la fórmula 14)}$$

$$N_\gamma = 8.31 \text{ (según la fórmula 15)}$$

Luego se realizó el cálculo de los factores de forma (F_{cs} , F_{qs} , $F_{\gamma s}$)

$$F_{cs} = 1.72 \text{ (según la fórmula 16)}$$

$$F_{qs} = 1.64 \text{ (según la fórmula 17)}$$

$$F_{\gamma s} = 0.40 \text{ (según la fórmula 18)}$$

Lo siguiente fue el cálculo de los factores por profundidad (F_{cd} , F_{qd} , $F_{\gamma d}$)

$$F_{cd} = 1.09 \text{ (según la fórmula 22)}$$

$$F_{qd} = 1.08 \text{ (según la fórmula 21)}$$

$$F_{\gamma d} = 1.00 \text{ (según la fórmula 23)}$$

Por último, se obtuvo los factores por inclinación de carga (F_{ci} , F_{qi} , $F_{\gamma i}$)

$$F_{ci} = 1.00 \text{ (según la fórmula 24)}$$

$$F_{qi} = 1.00 \text{ (según la fórmula 24)}$$

$$F_{\gamma i} = 1.00 \text{ (según la fórmula 25)}$$

Finalmente se obtuvo la capacidad de carga última del suelo de apoyo utilizando la fórmula 26; adicionalmente con ayuda de normativa peruana (E.050) se identificó el factor de seguridad y se pudo obtener la capacidad de carga admisible que tiene el suelo de apoyo según la fórmula 27.

$$q_u = 49.26 \text{ Ton/m}^2$$

$$F_s = 3$$

$$Q_{adm} = 16.42 \text{ Ton/m}^2 = 1.64 \text{ kg/cm}^2$$

5.3 Capacidad portante dinámica (Sin solución geotécnica)

Parámetros iniciales para los cálculos respectivos según EMS.

$$\phi = 32.60^\circ$$

$$C = 0.10 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\gamma_1 = 1.70 \text{ Ton/m}^3$$

$$\gamma_2 = 1.75 \text{ Ton/m}^3$$

$$D_f = 2.00 \text{ m}$$

$$B = 1.50 \text{ m}$$

Primero se obtuvo la carga efectiva al fondo de la cimentación según la fórmula 28, obteniendo el siguiente resultado:

$$q = 3.5 \text{ Ton/m}^2$$

Datos sísmicos.

$$a_{max} = 0.45g$$

$$F_a = 1.05$$

Nota: Los datos se tomaron del estudio de mecánica de suelos “Servicio de consultoría para la supervisión del servicio de ingeniería, suministro y construcción de tanques para almacenamiento de Diesel en refinería Talara.”

Para el cálculo de los factores de capacidad de carga dinámica y estática se utilizarán diferentes gráficas; previamente se debe obtener el parámetro $\tan(\Phi)$, el cual se obtiene considerando condiciones críticas en base a la fórmula 31, fórmula 29 y fórmula 30.

Dando el siguiente resultado:

$$\tan(\Phi) = 0.32 = Kh^*$$

Una vez obtenido el parámetros $\tan(\Phi)$ y conociendo los parámetros de resistencia del suelo se pudo obtener lo siguiente:

Factores de capacidad de carga Estática (N_q , N_γ)

En base a la figura 5

$$N_q = 9$$

$$N_\gamma = 11$$

En base a la tabla 3

$$N_q = 9.2$$

$$N_\gamma = 11.8$$

Factores de capacidad de carga Dinámica (N_{qE} , $N_{\gamma E}$)

En base a la figura 4

$$N_{qE} = 3.42$$

$$N_{\gamma E} = 1.42$$

Finalmente se obtuvo la capacidad de carga última en condición dinámica utilizando la fórmula 32; adicionalmente con ayuda de la normativa peruana (E.050) se identificó el factor de seguridad y se pudo obtener la capacidad de carga admisible que tiene el suelo de apoyo según la fórmula 33.

$$q_{uE} = 14.06 \text{ Ton/m}^2$$

$$F.S = 3$$

$$q_{adm} = 4.69 \text{ Ton/m}^2 = 0.47 \text{ kg/cm}^2$$

5.4 Implementando solución geotécnica: Columna de grava

En el diseño de las columnas de gravas, se emplearon los resultados obtenidos de los ensayos realizados en el campo, que se detallan en el "Estudio Mecánica de Suelos Centro de Salud Limón de Porcuya, Distrito de Huarmaca, Provincia Huancabamba, Región Piura" (Ayasca Ilizarbe & Quispe Salvatierra, 2022). La altura total del suelo arcilloso se tomó como 5 m, y para el diseño de las columnas se consideró un diámetro de 1.00 m y un espaciamiento de 2.00 m entre ejes. Se optó por el uso de mallas triangulares equiláteras debido a su mayor densidad de tratamiento. Los datos iniciales para el diseño de las columnas de grava se basaron en la "Tabla N° 33" del estudio mencionado.

Tabla 13*Datos Iniciales para el Diseño de Columnas de Gravas*

Descripción	Símbolo	Dimensión
Altura de la Columna	Hc	5 m
Ángulo de fricción - columna	Φ	40 °
Diámetro de la columna	Dc	1.00 m
Área de columna	Ac	0.79 m ²
Separación entre Columnas	s	2.00 m
Razón de sustitución	ar	0.227

Nota. Elaboración propia

Según las fórmulas 34, 35, 36, 39 hallamos la cohesión, ángulo de fricción, resistencia al cortante y el peso específico del suelo con columna de grava:

$$c'_{\text{comp}} = 0.10(1-7900/200^2)=0.080 \text{ kg/cm}^2$$

$$\phi'_{\text{comp}}=\arctan((7900/200^2).\tan(40^\circ)+(1-(7900/200^2)).\tan(32.6^\circ))=34.174^\circ$$

$$\tau_{\text{comp}} = 0.17 \cdot \tan(34.174^\circ)+0.080=0.195 \text{ kg/cm}^2$$

$$\gamma_{\text{comp}1}=(7900/200^2).0,00170+(1-(7900/200^2)).0,0022$$

$$\gamma_{\text{comp}1}=0,00210\text{kg/cm}^3=2,10 \text{ Ton/m}^3$$

$$\gamma_{\text{comp}2}=(7900/200^2).0,00175+(1-(7900/200^2)).0,0022$$

$$\gamma_{\text{comp}2}=0,00211\text{kg/cm}^3=2.11 \text{ Ton/m}^3$$

De la tabla 9 y sus N de campo correspondientes procedemos a usar la gráfica de la figura 6 para cada N de campo sin mejora para obtener el N de campo mejorado mediante la razón de sustitución ar por columna de grava:

Tabla 14*N mejorados por Diseño de Columnas de Gravas*

Profundidad (m)	N	N mejorado
1	4	35
1.5	5	36
2	7	38
3	11	39
4	21	40
5	29	40

Nota. Elaboración propia

5.5 Implementando solución geotécnica: Inyección de estabilizadores químicos

En el artículo "Use of Gypsum Waste and Tin Tailings as Stabilization Materials for Clay to Improve Quality of Subgrade" (Apriyanti et al., 2019), se exploró el uso de residuos de yeso y relaves de estaño para mejorar la estabilidad del suelo arcilloso.

De la tesis anteriormente mencionada la siguiente tabla presenta los resultados de las pruebas de mejora de la cohesión, el ángulo de fricción y la resistencia al corte del suelo arcilloso después de la adición de relaves y yeso. Las mejoras se expresan en términos de porcentaje en relación con las condiciones iniciales del suelo, lo cual se puede apreciar en la tabla 8. Además, que podemos analizar las figuras 10, 11 y 12 de la presente tesis y ajustar los datos a una función lineal mediante el método de mínimos cuadrados o ajuste polinomial según corresponda el tipo de curva.

Tabla 15

Ajuste Lineal de los Datos de Resistencia al Corte con la Adición de Relaves y Yeso

x	y	xy	x ²
0	21.77	0	0
20	33.517	670.34	400
30	41.593	1247.79	900
40	49.477	1979.08	1600
Σ 90	146.357	3897.21	2900

Nota. Elaboración propia

Tabla 16

Resultados del Ajuste Lineal de los Datos de Resistencia al Corte con la Adición de Relaves y Yeso

N=	4
m=	0.690488571
b=	21.05325714

Nota. Elaboración propia

De lo cual tendremos la siguiente formula:

$$\tau = 0.6905(\% \text{de residuos de yeso y relaves de estaño}) + (\text{resistencia al corte inicial})$$

τ : KN/m²

Con esta fórmula podremos calcular el esfuerzo cortante para cualquier porcentaje de adición de residuos de yeso y relaves de estaño

Usando nuestro esfuerzo cortante en el estrato donde el F.L es más crítico y un % de adición de 40% tendríamos lo siguiente:

$$\sigma_v = 1.7 \quad \text{T/m}^2$$

$$\sigma_v = 16.677 \text{ KN/m}^2$$

$$\tau_{\text{inicial}} = 16.677 \tan(32.6) + 9.80 = 20.465 \text{ KN/m}^2$$

$$\tau_{\text{inicial}} = 33.600 \tan(32.6) + 9.80 = 31.288 \text{ KN/m}^2$$

$$\tau = 0.6905(25) + (20.465) = 37.7275 \text{ KN/m}^2 = 3.85 \text{ Ton/m}^2$$

$$\tau = 0.6905(25) + (31.288) = 46.513 \text{ KN/m}^2 = 4.74 \text{ Ton/m}^2$$

Con este esfuerzo cortante mejorado podemos calcular un peso específico mejorado:

$$0.385 = 1 \cdot \gamma_{\text{mejorado}.1} \cdot \tan(40) + 0.132$$

$$\rightarrow \gamma_{\text{mejorado}.1} = 0.003 \text{ kg/cm}^3 = 3 \text{ T/m}^3$$

$$0.474 = (0.003 (1.5) + \gamma_{\text{mejorado}.2} \cdot 0.5) \tan(40) + 0.132$$

Por otro lado, podemos analizar la Figura 11 de la presente tesis y ajustar los datos a una función cuadrática mediante el método de interpolación de Newton que se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17

Ajuste Polinómico de los Datos de Ángulo de Fricción con la Adición de Relaves y Yeso

i	x	y	C1	C2	Φ
0	0	26.7100	0.5620	-0.0057	-0.0001
1	20	37.9500	0.3910	-0.0111	
2	30	41.8600	0.1700		
3	40	43.5600			

Nota. Elaboración propia

A continuación, con esta la Tabla 17 establecemos el polinomio interpolador y su respectivo error:

$$P(x) = y_0 + C_{11}(x-x_0) + C_{21}(x-x_0)(x-x_1)$$

$$E(x) = \Phi(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)$$

Reemplazando datos :

$$P(x) = 26.7100 + 0.5620(x) - 0.0057(x)(x-20)$$

$$E(x) = -0.0001(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)$$

Adecuando la ecuación a un caso general:

$$\phi(x) = \phi_{\text{inicial}} + 0.5620(x) - 0.0057(x)(x-20)$$

Donde :

x: %de residuos de yeso y relaves de estaño

Usando nuestro ángulo de fricción del suelo base y un % de adición de 25% tendríamos lo siguiente:

$$\phi_{\text{mejorado}} = 40^\circ$$

Con un error de polinomio interpolador de:

$$E = 0.0625$$

$$E = 0.156\%$$

A continuación procedemos a analizar la Figura 10 de la presente tesis y ajustar los datos a una función cuadrática mediante el método de interpolación de Newton que se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18

Ajuste Polinómico de los Datos de la Cohesión con la Adición de Relaves y Yeso

i	x	y	C1	C2	Φ
0	0	3.10000	0.07500	0.01007	0.00001
1	20	4.60000	0.37700	0.01040	
2	30	8.37000	0.58500		
3	40	14.22000			

Nota. Elaboración propia

A continuación, con la Tabla 18 establecemos el polinomio interpolador y su respectivo error:

$$P(x) = y_0 + C_{11}(x-x_0) + C_{21}(x-x_0)(x-x_1)$$

$$E(x) = \Phi(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)$$

Reemplazando datos:

$$P(x) = 3.1 + 0.075(x) + 0.01007(x)(x-20)$$

$$E(x) = 0.00001(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)$$

Adecuando la ecuación a un caso general:

$$C(x) = C_{\text{inicial}} + 0.075(x) + 0.01007(x)(x-20)$$

Donde:

x: % de residuos de yeso y relaves de estaño

Usando nuestra cohesión del suelo base y un % de adición de 25% tendríamos lo siguiente:

C mejorado=12.944 KN/m²=0.132 kg/cm²

Con un error de polinomio interpolador de:

E=-0.00625

E= 0.10%

Finalmente procedemos a analizar la Tabla 6 de la presente tesis y ajustar los datos a una función cuadrática mediante el método de interpolación de Newton que se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19

Ahora Ajustaremos el N de Campo para un Polinomio Interpolador de Grado 2

i	x	y	C1	C2	Φ
0	5	12.0000	1.6667	-0.0369	0.0005
1	11	22.0000	0.9286	-0.0011	
2	25	35.0000	0.8519		
3	79	81.0000			

Nota. Elaboración propia

A continuación, con la tabla 19 establecemos el polinomio interpolador y su respectivo error:

$$P(x)=y_0+C_{11}(x-x_0)+C_{21}(x-x_0)(x-x_1)$$

$$E(x)= \Phi(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)$$

Reemplazando datos :

$$P(x)=12+1.6667(x-5)-0.0369(x-5)(x-11)$$

$$E(x)= 0.0005(x-5)(x-11)(x-25)$$

Adecuando la ecuación a un caso general:

$$N(x)= 12+1.6667(x-5)-0.0369(x-5)(x-11)$$

Donde:

x: N sin mejorar

$$N(4)=10$$

$$N(5)=12$$

$$N(7)=16$$

$$N(11)=22$$

$$N(21)=33$$

$$N(29)=37$$

5.6 Licuefacción del Suelo (Columna de Grava)

Parámetros mejorados utilizando columna de grava.

$$\phi = 34.174^\circ$$

$$C = 0.080 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\gamma_1 = 2.10 \text{ Ton/m}^3$$

$$\gamma_2 = 2.11 \text{ Ton/m}^3$$

$$D_f = 2.00 \text{ m}$$

$$B = 1.50 \text{ m}$$

Se tendrá en cuenta los datos del ensayo SPT del estudio de mecánica de suelos “servicio de ingeniería, suministro y construcción de dos tanques de 163 mb para almacenamiento de Diesel en refinería Talara”. Según (Figura 13).

Tabla 20

Valores Ncampo del Ensayo SPT Mejorados

Prof (m)	Ncampo
1.0	35
1.5	36
2.0	38
3.0	39
4.0	40
5.0	40
6.0	44

Nota. Los datos se tomaron de la implementación de columna de grava.

$$\text{Magnitud de momento} = 6.5^\circ$$

$$a_{max} = 0.45g$$

Nota: Los datos se tomaron del estudio de mecánica de suelos “Servicio de consultoría para la supervisión del servicio de ingeniería, suministro y construcción de tanques para almacenamiento de Diesel en refinería Talara.”

Primero se realizó el cálculo de la relación de esfuerzos (CN) según la fórmula 2 y 3, a diferentes profundidades.

1.00 m

$$\sigma_v = 2.1 \quad \text{T/m}^2$$

$$\mu = 0 \quad \text{T/m}^2 \quad \text{CN} = 1.70$$

$$\sigma'_v = 2.1 \quad \text{T/m}^2$$

1.50 m

$$\sigma_v = 3.15 \quad \text{T/m}^2$$

$$\mu = 0 \quad \text{T/m}^2 \quad \text{CN} = 1.70$$

$$\sigma'_v = 3.15 \quad \text{T/m}^2$$

2.00 m

$$\sigma_v = 4.205 \quad \text{T/m}^2$$

$$\mu = 0.5 \quad \text{T/m}^2 \quad \text{CN} = 1.64$$

$$\sigma'_v = 3.705 \quad \text{T/m}^2$$

3.00 m

$$\sigma_v = 6.315 \quad \text{T/m}^2$$

$$\mu = 1.5 \quad \text{T/m}^2 \quad \text{CN} = 1.44$$

$$\sigma'_v = 4.815 \quad \text{T/m}^2$$

4.00 m

$$\sigma_v = 8.425 \quad \text{T/m}^2$$

$$\mu = 2.5 \quad \text{T/m}^2 \quad \text{CN} = 1.30$$

$$\sigma'_v = 5.925 \quad \text{T/m}^2$$

5.00 m

$$\sigma_v = 10.535 \quad \text{T/m}^2$$

$$\mu = 3.5 \quad \text{T/m}^2 \quad \text{CN} = 1.19$$

$$\sigma'_v = 7.035 \quad \text{T/m}^2$$

6.00 m

$$\sigma_v = 12.645 \quad \text{T/m}^2$$

$$\mu = 4.5 \quad \text{T/m}^2 \quad \text{CN} = 1.11$$

$$\sigma'_v = 8.145 \quad \text{T/m}^2$$

Una vez calculada la relación de esfuerzos para diferentes profundidades, se identificaron los factores de corrección según la tabla 1 y se procedió a calcular los valores de N70 y N60 según la fórmula 4 y 5 que se detallan en la tabla 21.

Tabla 21

Cálculo de los Valores N70 y N60

Profundidad (m)	N	CN	n1	n2	n3	n4	N70	N60
1.0	35	1.70	0.64	0.75	1.00	1.15	32.8	38.3
1.5	36	1.70	0.64	0.75	1.00	1.15	33.8	39.4
2.0	38	1.64	0.64	0.75	1.00	1.15	34.5	40.2
3.0	39	1.44	0.64	0.75	1.00	1.15	31.0	36.2
4.0	40	1.30	0.64	0.85	1.00	1.15	32.5	37.9
5.0	40	1.19	0.64	0.85	1.00	1.15	29.8	34.8
6.0	44	1.11	0.64	0.95	1.00	1.15	34.1	39.8

Nota. Elaboración propia

En base a los resultados obtenidos anteriormente se pudo encontrar la relación de esfuerzos cíclicos ($tl/\sigma'v$) según la figura 2 y tabla 2, también el esfuerzo de corte promedio inducido por el terremoto ($td/\sigma'v$) según la fórmula 1 y la fórmula 6, todo ello detallado en la tabla 22.

Tabla 22

Cálculo de la Relación de Esfuerzos Cíclicos ($tl/\sigma'v$) y Relación de Esfuerzos de Corte Debido al Sismo ($td/\sigma'v$)

Profundidad (m)	$tl/\sigma'v$	$m = 6.50$	$tl/\sigma'v$	$td/\sigma'v$
1.0	0.500	1.193	0.597	0.288
1.5	0.500	1.193	0.597	0.286
2.0	0.500	1.193	0.597	0.322
3.0	0.500	1.193	0.597	0.366
4.0	0.500	1.193	0.597	0.391
5.0	0.500	1.193	0.597	0.405
6.0	0.500	1.193	0.597	0.413

Nota. Elaboración propia

Finalmente se obtuvo el factor de licuefacción en la tabla 23 según la fórmula 7 para las diferentes profundidades

Tabla 23*Cálculo del Factor de Licuefacción*

Profundidad (m)	F. L	Suelo	Condición
1.0	2.07	SM	NO LICUA
1.5	2.09	SM	NO LICUA
2.0	1.85	SP-SM	NO LICUA
3.0	1.63	SM	NO LICUA
4.0	1.53	SM	NO LICUA
5.0	1.47	SM	NO LICUA
6.0	1.44	SM	NO LICUA

Nota. Elaboración propia**5.7 Capacidad Portante Estática (Columna de Grava)**

Parámetros mejorados utilizando columna de grava.

$$\phi = 34.174^\circ$$

$$C = 0.080 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\gamma_1 = 2.10 \text{ Ton/m}^3$$

$$\gamma_2 = 2.11 \text{ Ton/m}^3$$

$$D_f = 2.00 \text{ m}$$

$$B = 1.50 \text{ m}$$

Primero se realizó la corrección de la carga efectiva en el fondo de la cimentación considerando las condiciones mencionadas en la figura 3, fórmula 8 y fórmula 9.

Donde se cumple la siguiente condición:

$$\text{verificación: } 0 \leq D_1 \leq D_f$$

$$0 \leq 1.50 \leq 2$$

Obteniendo los siguientes valores:

$$q = 3.71 \text{ Ton/m}^2$$

$$\gamma' = 1.11 \text{ Ton/m}^3$$

Donde:

q: Carga efectiva al fondo de la cimentación

γ' : Peso unitario efectivo del suelo

Considerando una condición de falla localizada según la fórmula 11 y la fórmula 12, se precedió al cálculo de los parámetros de resistencia reducidos.

$$\phi' = 24.35^\circ$$

$$C' = 0.05 \text{ Ton/m}^2$$

Una vez obtenidos los parámetros de resistencia reducidos, se pudo realizar el cálculo de los diferentes factores de corrección por capacidad de carga, forma, profundidad e inclinación.

Primero se realizó el cálculo de los factores de capacidad de carga (N_c , N_q , N_γ)

$$N_q = 9.96 \text{ (según la fórmula 13)}$$

$$N_c = 19.80 \text{ (según la fórmula 14)}$$

$$N_\gamma = 9.92 \text{ (según la fórmula 15)}$$

Luego se realizó el cálculo de los factores de forma (F_{cs} , F_{qs} , $F_{\gamma s}$)

$$F_{cs} = 1.75 \text{ (según la fórmula 16)}$$

$$F_{qs} = 1.68 \text{ (según la fórmula 17)}$$

$$F_{\gamma s} = 0.40 \text{ (según la fórmula 18)}$$

Lo siguiente fue el cálculo de los factores por profundidad (F_{cd} , F_{qd} , $F_{\gamma d}$)

$$F_{cd} = 1.08 \text{ (según la fórmula 22)}$$

$$F_{qd} = 1.08 \text{ (según la fórmula 21)}$$

$$F_{\gamma d} = 1.00 \text{ (según la fórmula 23)}$$

Por último, se obtuvo los factores por inclinación de carga (F_{ci} , F_{qi} , $F_{\gamma i}$)

$$F_{ci} = 1.00 \text{ (según la fórmula 24)}$$

$$F_{qi} = 1.00 \text{ (según la fórmula 24)}$$

$$F_{\gamma i} = 1.00 \text{ (según la fórmula 25)}$$

Finalmente se obtuvo la capacidad de carga última del suelo de apoyo utilizando la fórmula 26; adicionalmente con ayuda de la normativa peruana (E.050) se identificó el factor de seguridad y se pudo obtener la capacidad de carga admisible que tiene el suelo de apoyo según la fórmula 27.

$$q_u = 71.97 \text{ Ton/m}^2$$

$$F.s = 3$$

$$Q_{adm} = 23.99 \text{ Ton/m}^2 = 2.40 \text{ kg/cm}^2$$

5.8 Capacidad Portante Dinámica (Columna de Grava)

Parámetros mejorados utilizando columna de grava.

$$\phi = 34.174^\circ$$

$$C = 0.080 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\gamma_1 = 2.10 \text{ Ton/m}^3$$

$$\gamma_2 = 2.11 \text{ Ton/m}^3$$

$$D_f = 2.00 \text{ m}$$

$$B = 1.50 \text{ m}$$

Primero se obtuvo la carga efectiva al fondo de la cimentación según la fórmula 28, obteniendo el siguiente resultado:

$$q = 4.22 \text{ Ton/m}^2$$

Datos sísmicos.

$$a_{\max} = 0.45g$$

$$F_a = 1.05$$

Nota: Los datos se tomaron del estudio de mecánica de suelos “Servicio de consultoría para la supervisión del servicio de ingeniería, suministro y construcción de tanques para almacenamiento de Diesel en refinería Talara.”

Para el cálculo de los factores de capacidad de carga dinámica y estática se utilizarán diferentes gráficas; previamente se debe obtener el parámetro $\tan(\Phi)$, el cual se obtiene considerando condiciones críticas en base a la fórmula 29, fórmula 31 y fórmula 30.

Dando el siguiente resultado:

$$\tan(\Phi) = 0.32 = K_h^*$$

Una vez obtenido $\tan(\Phi)$ y conociendo los parámetros de resistencia del suelo se pudo obtener lo siguiente:

Factores de capacidad de carga Estática (N_q , N_γ)

En base a la figura 5

$$N_q = 10$$

$$N_\gamma = 13$$

En base a la tabla 3

$$N_q = 10.5$$

$$N_\gamma = 14$$

Factores de capacidad de carga Dinámica (N_{qE} , $N_{\gamma E}$)

En base a la figura 4

$$N_{qE} = 4.15$$

$$N_{\gamma E} = 2.03$$

Finalmente se obtuvo la capacidad de carga última en condición dinámica utilizando la fórmula 32; adicionalmente con ayuda de normativa peruana (E.050) se identificó el

factor de seguridad y se pudo obtener la capacidad de carga admisible que tiene el suelo de apoyo según la fórmula 33.

$$q_{uE} = 20.732 \text{ Ton/m}^2$$

$$F.S = 3$$

$$Q_{adm} = 6.91 \text{ Ton/m}^2 = 0.69 \text{ kg/cm}^2$$

5.9 Licuefacción del Suelo (Inyección de Estabilizadores)

Parámetros mejorados utilizando inyección de estabilizadores químicos.

$$\phi = 40.00^\circ$$

$$C = 0.132 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\gamma_1 = 3.00 \text{ Ton/m}^3$$

$$D_f = 2.00 \text{ m}$$

$$B = 1.50 \text{ m}$$

Se tendrá en cuenta los datos del ensayo SPT del estudio de mecánica de suelos “Servicio de ingeniería, suministro y construcción de tanques para el almacenamiento de hidrocarburo en Talara” para realizar la tabla 24. Según (Figura 13)

Tabla 24

Valores Ncampo del Ensayo SPT Mejorados

Prof (m)	Ncampo
1.0	10
1.5	12
2.0	16
3.0	22
4.0	33
5.0	37
6.0	44

Nota. Los datos se tomaron de la implementación de inyección de estabilizadores químicos.

$$\text{Magnitud de momento} = 6.5^\circ$$

$$a_{max} = 0.45g$$

Nota: Los datos se tomaron del estudio de mecánica de suelos “Servicio de consultoría para la supervisión del servicio de ingeniería, suministro y construcción de tanques para almacenamiento de Diesel en refinería Talara.”

Primero se realizó el cálculo de la relación de esfuerzos (CN) según la fórmula 2 y 3, a diferentes profundidades.

1.00 m

$$\begin{aligned}\sigma_v &= 3 & \text{T/m}^2 \\ \mu &= 0 & \text{T/m}^2 \\ \sigma'_v &= 3 & \text{T/m}^2\end{aligned}\quad \text{CN} = 1.70$$

1.50 m

$$\begin{aligned}\sigma_v &= 4.5 & \text{T/m}^2 \\ \mu &= 0 & \text{T/m}^2 \\ \sigma'_v &= 4.5 & \text{T/m}^2\end{aligned}\quad \text{CN} = 1.49$$

2.00 m

$$\begin{aligned}\sigma_v &= 6 & \text{T/m}^2 \\ \mu &= 0.5 & \text{T/m}^2 \\ \sigma'_v &= 5.5 & \text{T/m}^2\end{aligned}\quad \text{CN} = 1.35$$

3.00 m

$$\begin{aligned}\sigma_v &= 9 & \text{T/m}^2 \\ \mu &= 1.5 & \text{T/m}^2 \\ \sigma'_v &= 7.5 & \text{T/m}^2\end{aligned}\quad \text{CN} = 1.15$$

4.00 m

$$\begin{aligned}\sigma_v &= 12 & \text{T/m}^2 \\ \mu &= 2.5 & \text{T/m}^2 \\ \sigma'_v &= 9.5 & \text{T/m}^2\end{aligned}\quad \text{CN} = 1.03$$

5.00 m

$$\begin{aligned}\sigma_v &= 15 & \text{T/m}^2 \\ \mu &= 3.5 & \text{T/m}^2 \\ \sigma'_v &= 11.5 & \text{T/m}^2\end{aligned}\quad \text{CN} = 0.93$$

6.00 m

$$\sigma_v = 18 \quad \text{T/m}^2$$

$$\mu = 4.5 \quad \text{T/m}^2 \quad \text{CN} = 0.86$$

$$\sigma'v = 13.5 \quad \text{T/m}^2$$

Una vez calculada la relación de esfuerzos para diferentes profundidades, se identificaron los factores de corrección según la tabla 1 y se procedió a calcular los valores de N70 y N60 según la fórmula 4 y 5 y se realizo la tabla 25 .

Tabla 25

Cálculo de los Valores N70 y N60

Profundidad (m)	N	CN	n1	n2	n3	n4	N70	N60
1.0	10	1.70	0.64	0.75	1.00	1.15	9.4	10.9
1.5	12	1.49	0.64	0.75	1.00	1.15	9.9	11.5
2.0	16	1.35	0.64	0.75	1.00	1.15	11.9	13.9
3.0	22	1.15	0.64	0.75	1.00	1.15	14.0	16.4
4.0	33	1.03	0.64	0.85	1.00	1.15	21.2	24.7
5.0	37	0.93	0.64	0.85	1.00	1.15	21.6	25.2
6.0	44	0.86	0.64	0.95	1.00	1.15	26.5	30.9

Nota. Elaboración propia

En base a los resultados obtenidos anteriormente se pudo encontrar la relación de esfuerzos cíclicos ($tl/\sigma'v$) según la figura 2 y tabla 2, también el esfuerzo de corte promedio inducido por el terremoto ($td/\sigma'v$) según la fórmula 1 y la fórmula 6.

Tabla 26

Cálculo de la Relación de Esfuerzos Cíclicos ($tl/\sigma'v$) y Relación de Esfuerzos de Corte Debido al Sismo ($td/\sigma'v$)

Profundidad (m)	$tl/\sigma'v$	$m = 6.50$	$tl/\sigma'v$	$td/\sigma'v$
1.0	0.135	1.193	0.161	0.288
1.5	0.160	1.193	0.191	0.286
2.0	0.180	1.193	0.215	0.310
3.0	0.210	1.193	0.251	0.335
4.0	0.315	1.193	0.376	0.347
5.0	0.330	1.193	0.394	0.353
6.0	0.380	1.193	0.453	0.355

Nota. Elaboración propia

Finalmente se obtuvo el factor de licuefacción según la fórmula 7 para las diferentes profundidades.

Tabla 27

Cálculo del Factor de Licuefacción

Profundidad (m)	F.L	Suelo	Condición
1.0	0.56	SM	LICUA
1.5	0.67	SM	LICUA
2.0	0.69	SP-SM	LICUA
3.0	0.75	SM	LICUA
4.0	1.08	SM	NO LICUA
5.0	1.12	SM	NO LICUA
6.0	1.28	SM	NO LICUA

Nota. Elaboración propia

5.10 Capacidad Portante Estática (Inyección de Estabilizadores)

Parámetros mejorados utilizando inyección de estabilizadores químicos.

$$\varphi = 40.00^\circ$$

$$C = 0.132 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\gamma_1 = 3.00 \text{ Ton/m}^3$$

$$D_f = 2.00 \text{ m}$$

$$B = 1.50 \text{ m}$$

Primero se realizó la corrección de la carga efectiva en el fondo de la cimentación considerando las condiciones mencionadas en la figura 3, fórmula 8 y fórmula 9.

Donde se cumple la siguiente condición:

$$\text{verificación: } 0 \leq D_1 \leq D_f$$

$$0 \leq 1.50 \leq 2$$

Obteniendo los siguientes valores:

$$q = 5.50 \text{ Ton/m}^2$$

$$\gamma' = 2.00 \text{ Ton/m}^3$$

Donde:

q: Carga efectiva al fondo de la cimentación

γ' : Peso unitario efectivo del suelo

Considerando una condición de falla localizada según la fórmula 11 y la fórmula 12, se precedió al cálculo de los parámetros de resistencia reducidos.

$$\phi' = 29.22^\circ$$

$$C' = 0.09 \text{ Ton/m}^2$$

Una vez obtenidos los parámetros de resistencia reducidos, se pudo realizar el cálculo de los diferentes factores de corrección por capacidad de carga, forma, profundidad e inclinación.

Primero se realizó el cálculo de los factores de capacidad de carga (N_c , N_q , N_γ)

$$N_q = 16.86 \text{ (según la fórmula 13)}$$

$$N_c = 28.35 \text{ (según la fórmula 14)}$$

$$N_\gamma = 19.98 \text{ (según la fórmula 15)}$$

Luego se realizó el cálculo de los factores de forma (F_{cs} , F_{qs} , $F_{\gamma s}$)

$$F_{cs} = 1.89 \text{ (según la fórmula 16)}$$

$$F_{qs} = 1.84 \text{ (según la fórmula 17)}$$

$$F_{\gamma s} = 0.40 \text{ (según la fórmula 18)}$$

Lo siguiente fue el cálculo de los factores por profundidad (F_{cd} , F_{qd} , $F_{\gamma d}$)

$$F_{cd} = 1.08 \text{ (según la fórmula 22)}$$

$$F_{qd} = 1.07 \text{ (según la fórmula 21)}$$

$$F_{\gamma d} = 1.00 \text{ (según la fórmula 23)}$$

Por último, se obtuvo los factores por inclinación de carga (F_{ci} , F_{qi} , $F_{\gamma i}$)

$$F_{ci} = 1.00 \text{ (según la fórmula 24)}$$

$$F_{qi} = 1.00 \text{ (según la fórmula 24)}$$

$$F_{\gamma i} = 1.00 \text{ (según la fórmula 25)}$$

Finalmente se obtuvo la capacidad de carga última del suelo de apoyo utilizando la fórmula 26; adicionalmente con ayuda de la normativa peruana (E.050) se identificó el factor de seguridad y se pudo obtener la capacidad de carga admisible que tiene el suelo de apoyo según la fórmula 27.

$$q_u = 199.67 \text{ Ton/m}^2$$

$$F_s = 3$$

$$q_{adm} = 66.56 \text{ Ton/m}^2 = 6.66 \text{ kg/cm}^2$$

5.11 Capacidad Portante Dinámica (Inyección de Estabilizadores)

Parámetros mejorados utilizando inyección de estabilizadores químicos.

$$\phi = 40.00^\circ$$

$$C = 0.132 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\gamma_1 = 3.00 \text{ Ton/m}^3$$

$$D_f = 2.00 \text{ m}$$

$$B = 1.50 \text{ m}$$

Primero se obtuvo la carga efectiva al fondo de la cimentación según la fórmula 28, obteniendo el siguiente resultado:

$$q = 6.00 \text{ Ton/m}^2$$

Datos sísmicos.

$$a_{\max} = 0.45g$$

$$F_a = 1.05$$

Nota: Los datos se tomaron del estudio de mecánica de suelos “Servicio de consultoría para la supervisión del servicio de ingeniería, suministro y construcción de tanques para almacenamiento de Diesel en refinería Talara.”

Para el cálculo de los factores de capacidad de carga dinámica y estática se utilizarán diferentes gráficas; previamente se debe obtener el parámetro $\tan(\Phi)$, el cual se obtiene considerando condiciones críticas en base a la fórmula 29, fórmula 31 y fórmula 30.

Dando el siguiente resultado:

$$\tan(\Phi) = 0.32 = K_h^*$$

Una vez obtenido $\tan(\Phi)$ y conociendo los parámetros de resistencia del suelo se pudo obtener lo siguiente:

Factores de capacidad de carga Estática (N_q , N_γ)

En base a la figura 5

$$N_q = 17$$

$$N_\gamma = 24$$

En base a la tabla 3

$$N_q = 15.7$$

$$N_\gamma = 22.4$$

Factores de capacidad de carga Dinámica (N_{qE} , $N_{\gamma E}$)

En base a la figura 4

$$N_{qE} = 6.19$$

$$N_{\gamma E} = 4.04$$

Finalmente se obtuvo la capacidad de carga última en condición dinámica utilizando la fórmula 32; adicionalmente con ayuda de normativa peruana (E.050) se identificó el

factor de seguridad y se pudo obtener la capacidad de carga admisible que tiene el suelo de apoyo según la fórmula 33.

$$q_{uE} = 46.243 \text{ Ton/m}^2$$

$$F.S = 3$$

$$Q_{adm} = 15.41 \text{ Ton/m}^2 = 1.54 \text{ kg/cm}^2$$

CAPÍTULO VI: CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

6.1 Contrastación de la hipótesis general

Resultados con Columnas de Grava:

- $c_{comp}' = 0.080 \text{ kg/cm}^2$
- $\phi_{comp}' = 34.174^\circ$
- $\tau_{comp} = 0.195 \text{ kg/cm}^2$
- $\gamma_{comp1} = 0.00210 \text{ kg/cm}^3 = 2.10 \text{ T/m}^3$
- $\gamma_{comp2} = 0.00211 \text{ kg/cm}^3 = 2.11 \text{ T/m}^3$
- N de campo a 1m mejorado = 35
- N de campo a 1.5 m mejorado = 36
- N de campo a 2m mejorado = 38
- N de campo a 3m mejorado = 39
- N de campo a 4m mejorado = 40
- N de campo a 5m mejorado = 40

Porcentaje de mejora = $(\text{Valor mejorado} - \text{Valor original} / \text{Valor original}) \times 100\%$

Calculamos el porcentaje de mejora para cada parámetro:

Cohesión (c'):

Porcentaje de mejora = $(0.080 - 0.10 / 0.10) \times 100\% = -20\%$

Ángulo de fricción (ϕ'):

Porcentaje de mejora = $(34.174 - 32.6 / 32.6) \times 100\% \approx 4.83\%$

Resistencia al cortante (τ):

Porcentaje de mejora = $(0.195 - 0.209395 / 0.209395) \times 100\% \approx -6.82\%$

Peso específico (γ):

Porcentaje de mejora = $(2.10 - 1.70 / 1.70) \times 100\% \approx 23.529\%$

N de campo a 1m mejorado

Porcentaje de mejora = $(35 - 4 / 4) \times 100\% \approx 775\%$

N de campo a 1.5 m mejorado

Porcentaje de mejora = $(36 - 5 / 5) \times 100\% \approx 620\%$

N de campo a 2m mejorado

Porcentaje de mejora = $(38 - 7 / 7) \times 100\% \approx 442.857\%$

N de campo a 3m mejorado

Porcentaje de mejora = $(39 - 11 / 11) \times 100\% \approx 254.545\%$

N de campo a 4m mejorado

Porcentaje de mejora= $(40-21/21) \times 100\% \approx 90.476\%$

N de campo a 5m mejorado

Porcentaje de mejora= $(40-29/29) \times 100\% \approx 37.931\%$

En base a esta data se procedió a realizar la tabla 28.

Tabla 28

Porcentaje de Mejora con Columnas de Grava

Parámetro	Valor Original	Valor Mejorado	Porcentaje de Mejora
Cohesión (c')	0.10 kg/cm ²	0.080 kg/cm ²	-20%
Ángulo de fricción (φ')	32.6°	34.174°	4.83%
Resistencia al cortante (τ)	0.209 kg/cm ²	0.195 kg/cm ²	-6.82%
Peso específico (γ1)	1,70 T/m ³	2,10 T/m ³	23,529%
N de campo a 1m	4	35	775%
N de campo a 1.5m	5	36	620%
N de campo a 2m	7	38	442.857%
N de campo a 3m	11	39	254.545%
N de campo a 4m	21	40	90.476%
N de campo a 5m	29	40	37.931%

Nota. Elaboración propia

Resultados con Inyección de Estabilizadores Químicos:

- cmejorada = 0.132 kg/cm²
- φmejorado = 40°
- τmejorado = 0.385 kg/cm²
- γmejorado1=0.003kg/cm³=3 T/m³
- N de campo a 1m mejorado= 10
- N de campo a 1.5 m mejorado= 12
- N de campo a 2m mejorado= 16
- N de campo a 3m mejorado= 22
- N de campo a 4m mejorado=33
- N de campo a 5m mejorado= 37

Porcentaje de mejora= $(\text{Valor mejorado}-\text{Valor original}/ \text{Valor original}) \times 100\%$

Calculamos el porcentaje de mejora para cada parámetro:

Cohesión (c'):

$$\text{Porcentaje de mejora} = (0.132 - 0.10 / 0.10) \times 100\% = 32\%$$

Ángulo de fricción (ϕ'):

$$\text{Porcentaje de mejora} = (40 - 32.6 / 32.6) \times 100\% \approx 22.700\%$$

Resistencia al cortante (τ):

$$\text{Porcentaje de mejora} = (0.385 - 0.209395 / 0.209395) \times 100\% \approx 83.863\%$$

Peso específico (γ_1):

$$\text{Porcentaje de mejora} = (3 - 1.70 / 1.70) \times 100\% \approx 76.471\%$$

N de campo a 1m mejorado

$$\text{Porcentaje de mejora} = (10 - 4 / 4) \times 100\% \approx 150\%$$

N de campo a 1.5 m mejorado

$$\text{Porcentaje de mejora} = (12 - 5 / 5) \times 100\% \approx 140\%$$

N de campo a 2m mejorado

$$\text{Porcentaje de mejora} = (16 - 7 / 7) \times 100\% \approx 128.571\%$$

N de campo a 3m mejorado

$$\text{Porcentaje de mejora} = (22 - 11 / 11) \times 100\% \approx 100\%$$

N de campo a 4m mejorado

$$\text{Porcentaje de mejora} = (33 - 21 / 21) \times 100\% \approx 57.143\%$$

N de campo a 5m mejorado

$$\text{Porcentaje de mejora} = (37 - 29 / 29) \times 100\% \approx 27.586\%$$

En base a estos datos se procedió a realizar la comparación de los distintos parámetros del suelo en las tablas 29, 30 y en las figuras 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25.

Tabla 29.*Porcentaje de Mejora con Inyección de Estabilizadores Químicos*

Parámetro	Valor Original	Valor Mejorado	Porcentaje de Mejora
Cohesión (c')	0.10 kg/cm ²	0.132 kg/cm ²	32%
Ángulo de fricción (φ')	32.6°	40°	22.700%
Resistencia al cortante (τ)	0.209 kg/cm ²	0.385kg/cm ²	83.863%
γmejorado1	1,70 T/m ³	3 T/m ³	76.471%
N de campo a 1m	4	10	150%
N de campo a 1.5m	5	12	140%
N de campo a 2m	7	16	128.571%
N de campo a 3m	11	22	100%
N de campo a 4m	21	33	57.143%
N de campo a 5m	29	37	27.586%

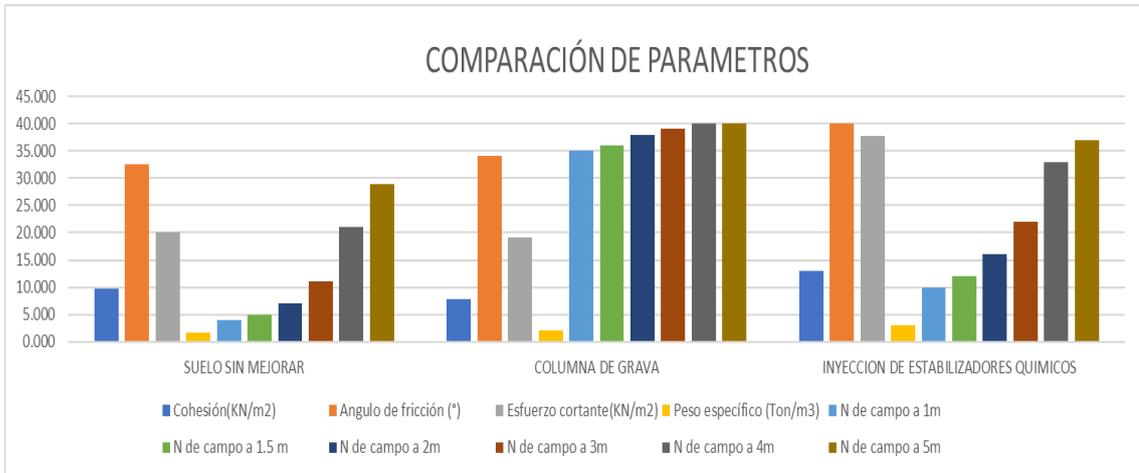
Nota. Elaboración propia**Tabla 30***Comparación de los Parámetros en las Tres Condiciones del Suelo*

Parámetro	Suelo Sin Mejorar	Columna De Grava	Inyección de Estabilizadores Químicos
Cohesión(kg/cm ²)	0.1	0.080	0.132
Angulo de fricción (°)	32.6	34.174	40.000
Esfuerzo cortante(kg/cm ²)	0.20395	0.196	0.385
Peso específico (Ton/m ³)	1.70	2.100	3.000
N de campo a 1m	4	35	10
N de campo a 1.5 m	5	36	12
N de campo a 2m	7	38	16
N de campo a 3m	11	39	22
N de campo a 4m	21	40	33
N de campo a 5m	29	40	37

Nota. Elaboración propia

Figura 14

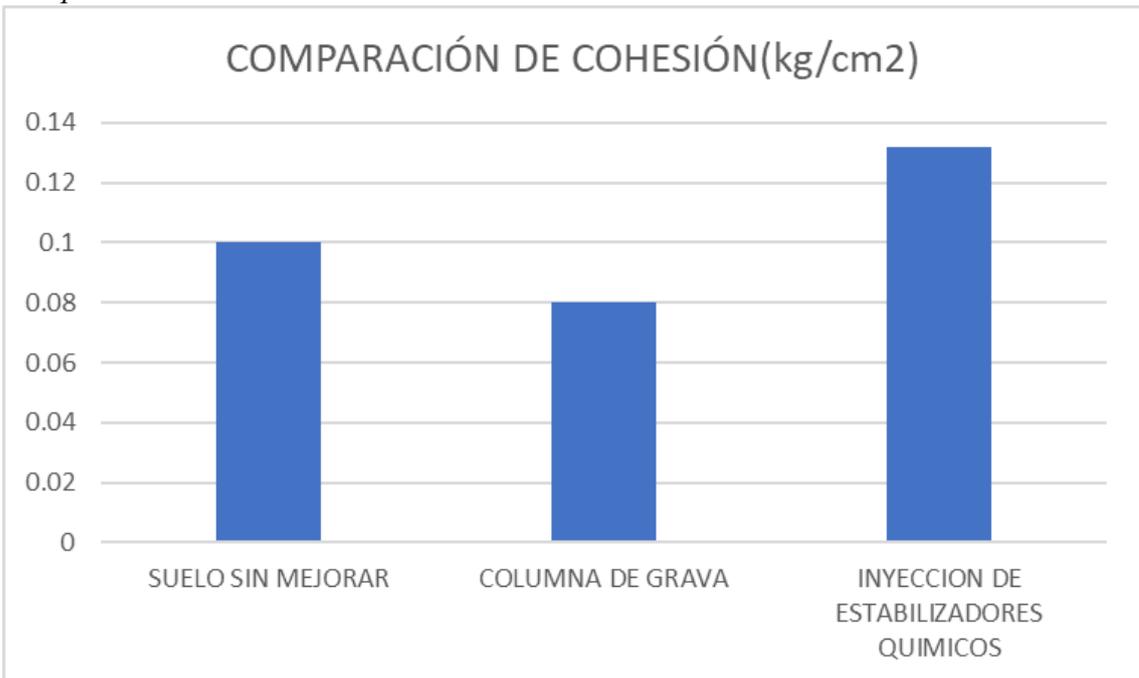
Comparación de los Parámetros en las Tres Condiciones del Suelo



Nota. Elaboración propia

Figura 15

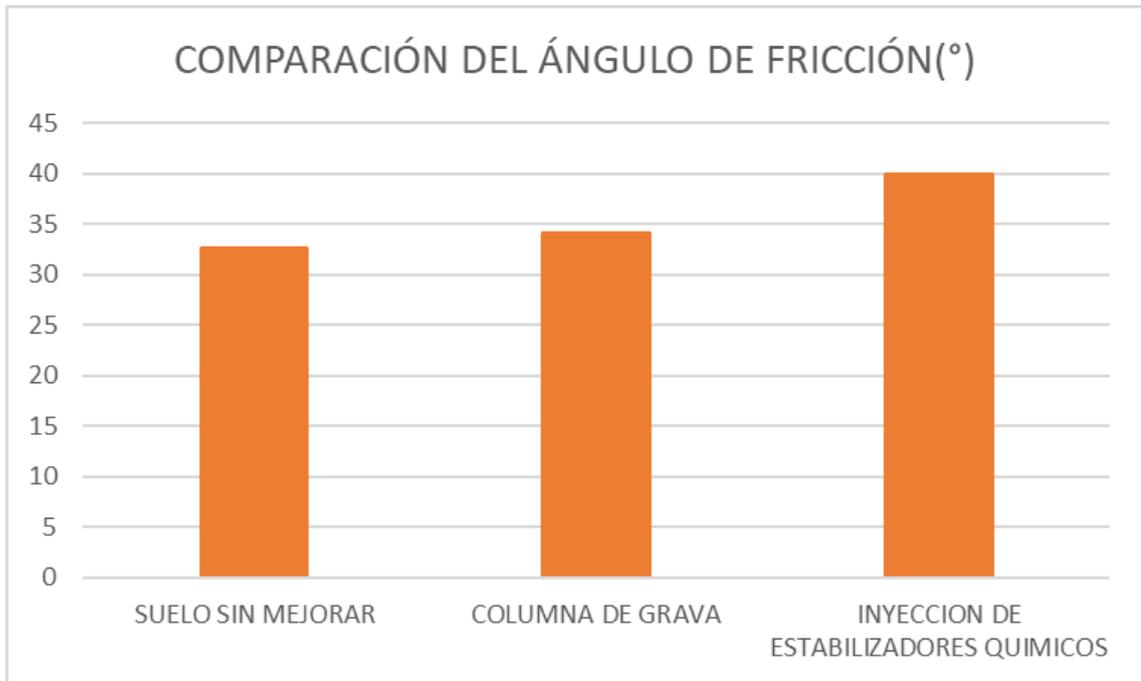
Comparación de la Cohesión en las Tres Condiciones del Suelo



Nota. Elaboración propia

Figura 16

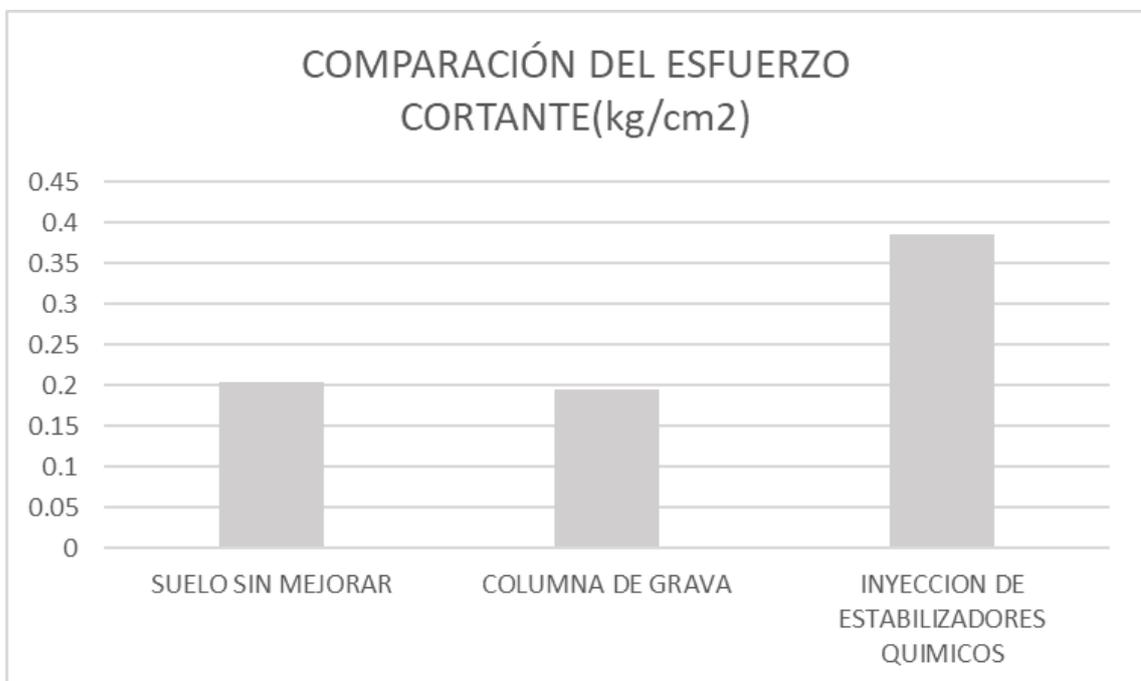
Comparación del Ángulo de Fricción en las Tres Condiciones del Suelo



Nota. Elaboración propia

Figura 17

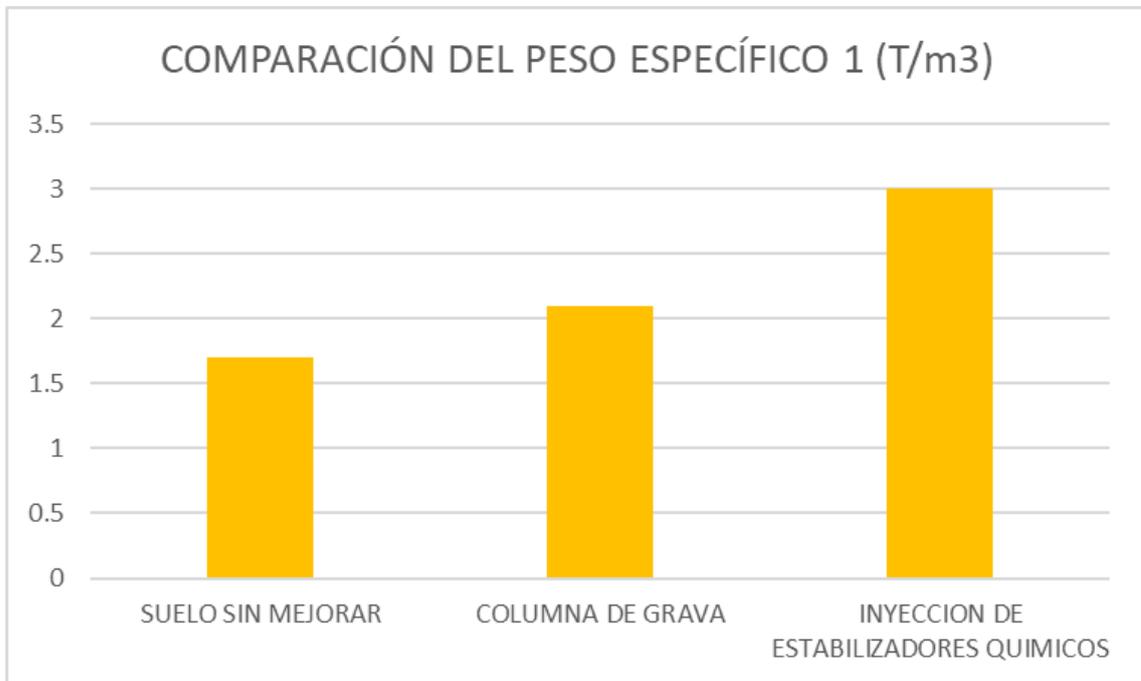
Comparación del Esfuerzo Cortante en las Tres Condiciones del Suelo



Nota. Elaboración propia

Figura 18

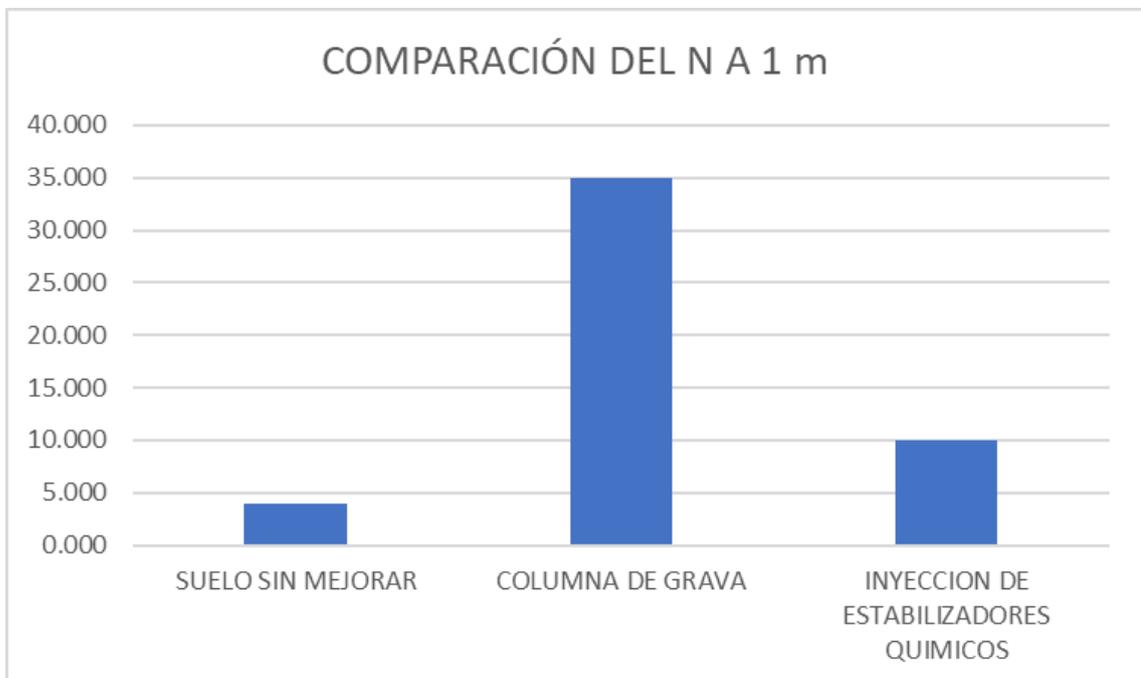
Comparación del Peso Específico 1 en las Tres Condiciones del Suelo



Nota. Elaboración propia

Figura 19

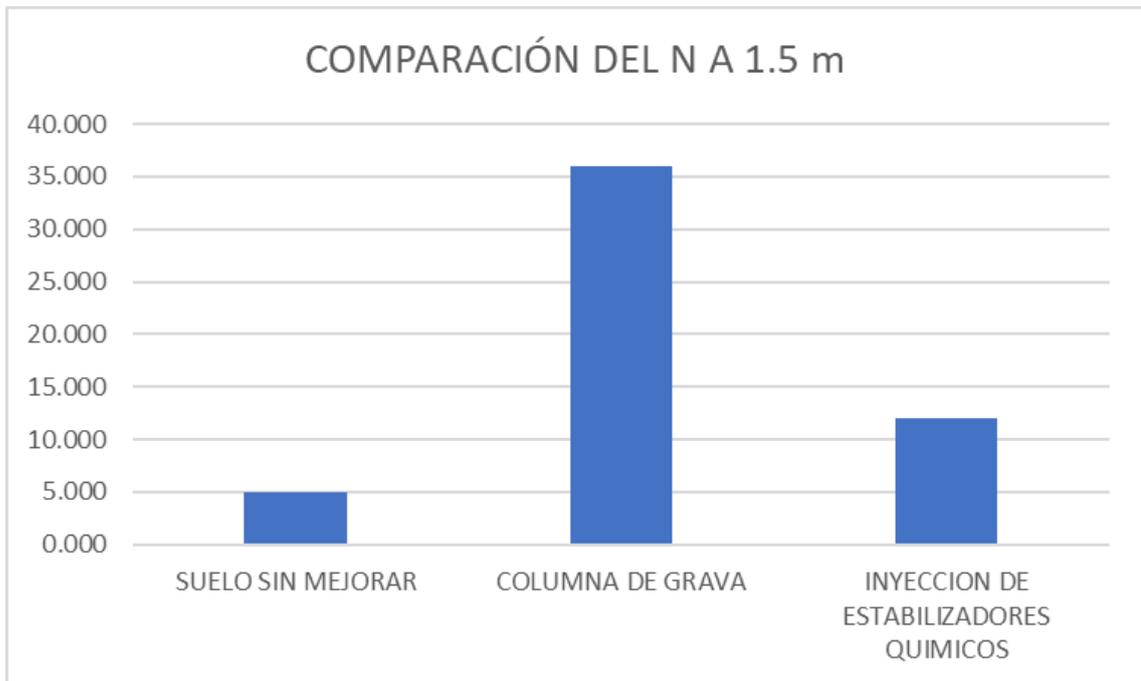
Comparación del N a 1m en las Tres Condiciones del Suelo



Nota. Elaboración propia

Figura 20

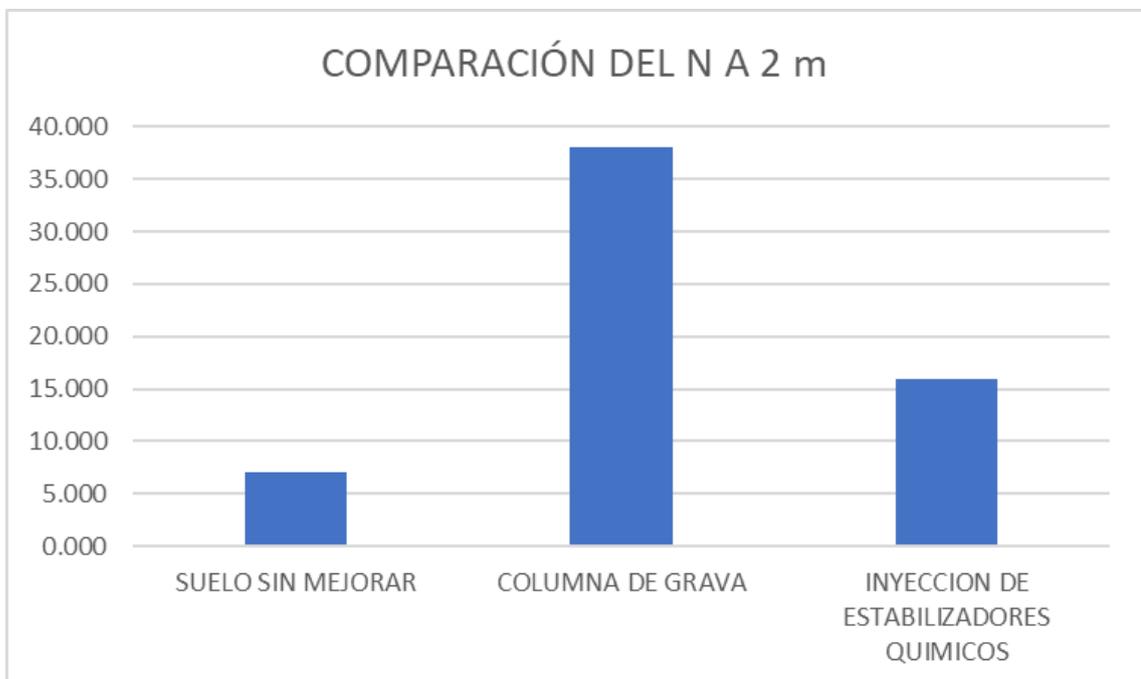
Comparación del N a 1.5m en las Tres Condiciones del Suelo



Nota. Elaboración propia

Figura 21

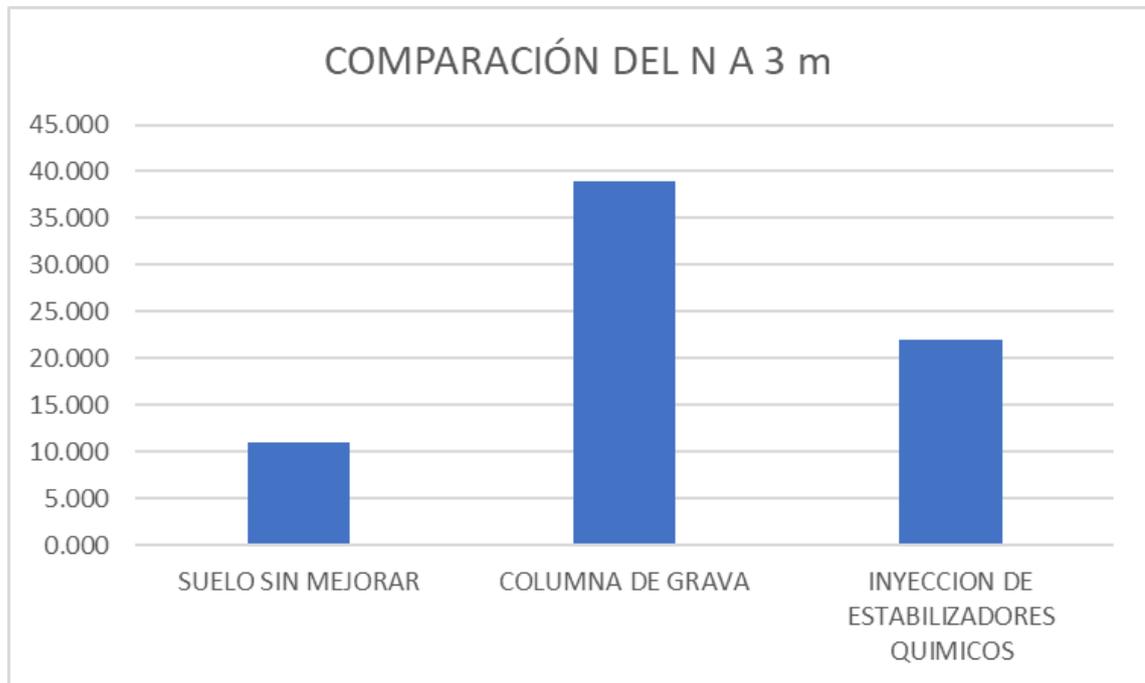
Comparación del N a 2m en las Tres Condiciones del Suelo



Nota. Elaboración propia

Figura 22

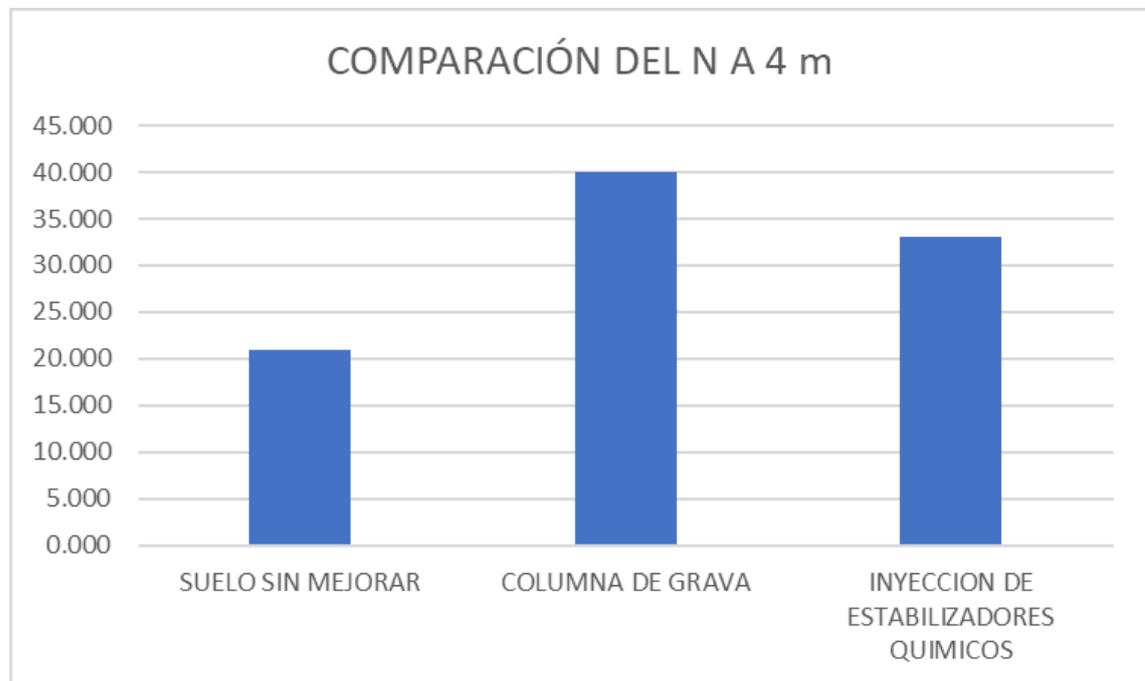
Comparación del N a 3m en las Tres Condiciones del Suelo



Nota. Elaboración propia

Figura 23

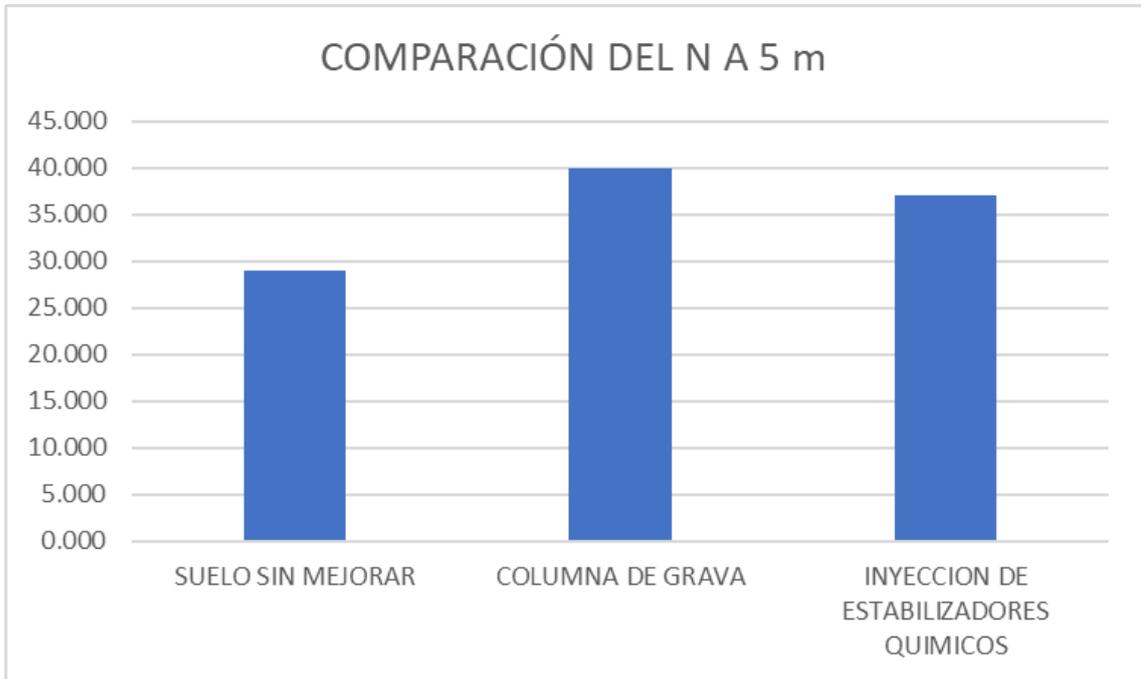
Comparación del N a 4m en las Tres Condiciones del Suelo



Nota. Elaboración propia

Figura 24

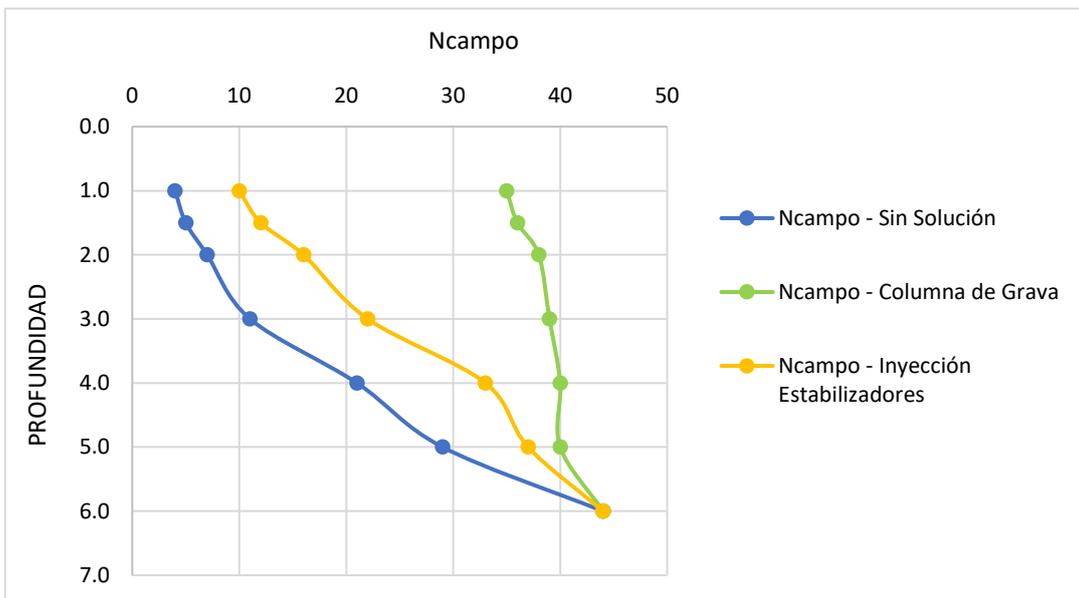
Comparación del N a 5m en las Tres Condiciones del Suelo



Nota. Elaboración propia

Figura 25

Mejora del Ncampo en las 3 condiciones del suelo.



Nota. Elaboración propia

Además, en las tablas 31 se hizo la comparación del potencial de licuefacción en las 3 condiciones del suelo y en la tabla 32 y figura 26 se realizó la comparación de la capacidad pórtante dinámica y estática en las Tres Condiciones del Suelo

Tabla 31*Comparación del potencial de licuefacción en las 3 condiciones del suelo*

Factor de Licuefacción - Sin Solución Geotécnica			
Profundidad (m)	F.L	Suelo	Condición
1.0	0.17	SM	LICUA
1.5	0.22	SM	LICUA
2.0	0.29	SP-SM	LICUA
3.0	0.44	SM	LICUA
4.0	0.76	SM	LICUA
5.0	1.03	SM	NO LICUA
6.0	1.27	SM	NO LICUA

Factor de Licuefacción - Columna de Grava			
Profundidad (m)	F.L	Suelo	Condición
1.0	2.07	SM	NO LICUA
1.5	2.09	SM	NO LICUA
2.0	1.85	SP-SM	NO LICUA
3.0	1.63	SM	NO LICUA
4.0	1.53	SM	NO LICUA
5.0	1.47	SM	NO LICUA
6.0	1.44	SM	NO LICUA

Factor de Licuefacción - Inyección Estabilizadores			
Profundidad (m)	F.L	Suelo	Condición
1.0	0.56	SM	LICUA
1.5	0.67	SM	LICUA
2.0	0.69	SP-SM	LICUA
3.0	0.75	SM	LICUA
4.0	1.08	SM	NO LICUA
5.0	1.12	SM	NO LICUA
6.0	1.28	SM	NO LICUA

Nota. Elaboración propia

Tabla 32

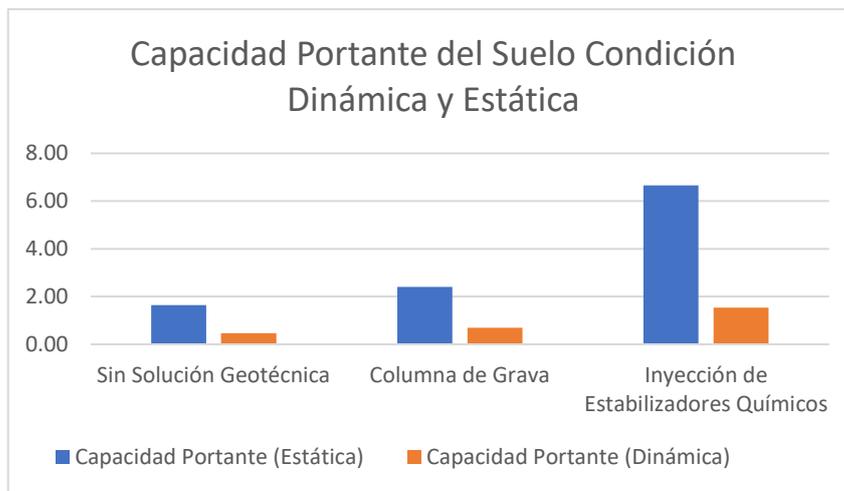
Comparación de la capacidad portante dinámica y estática en las Tres Condiciones del Suelo

Condición del Suelo	Capacidad Portante (Estática) kg/cm ²	Capacidad Portante (Dinámica) kg/cm ²
Sin Solución Geotécnica	1.64	0.47
Columna de Grava	2.40	0.69
Inyección de Estabilizadores Químicos	6.66	1.54

Nota. Elaboración propia

Figura 26

Comparación de la capacidad portante dinámica y estática en las Tres Condiciones del Suelo.



Nota. Elaboración propia

Finalmente, se procedió a comparar los porcentajes de mejora de la capacidad portante dinámica y estática en las tres condiciones del suelo

Tabla 33

Porcentaje de mejora de la capacidad portante dinámica y estática en las tres condiciones del suelo.

	Columna de Grava	Inyección de Estabilizadores Químicos
Capacidad portante estática (kg/cm ²)	46.34%	306.10%
Capacidad portante dinámica (kg/cm ²)	46.81%	227.66%

Nota. Elaboración propia

Análisis:

- **Propiedades Mecánicas:** La cohesión y el ángulo de fricción son mayores con la inyección de estabilizadores químicos en comparación con las columnas de grava. Esto indica que la inyección de estabilizadores químicos proporciona una mayor resistencia y estabilidad al suelo. La resistencia al cortante también es significativamente mayor con la inyección de estabilizadores químicos.
- **Peso Específico:** La densidad del suelo, reflejada en el peso específico, aumenta con ambas técnicas de mejora, siendo más pronunciado con la inyección de estabilizadores químicos.
- **N de Campo:** Los valores de "N de campo" muestran una mejora significativa con las columnas de grava en todas las profundidades en comparación con el suelo sin mejorar. Aunque la inyección de estabilizadores químicos también mejora el "N de campo" en comparación con el suelo sin mejorar, las columnas de grava presentan valores superiores en todas las profundidades.

Por lo tanto, mientras que la inyección de estabilizadores químicos es superior en términos de propiedades mecánicas y densidad, las columnas de grava ofrecen una mejora más significativa en la resistencia del suelo, reflejada en los valores de "N de campo".

- **Factor de Licuefacción:** La condición de licuefacción se mitiga en todas las profundidades del suelo estudiado utilizando columnas de grava como solución geotécnica; caso diferente es al utilizar inyección de estabilizadores químicos, donde se pudo observar que la mejora no es significativa. Lo cual es debido a la mejora que tiene el Ncampo utilizando columnas de grava respecto a la inyección de estabilizadores químicos.
- **Capacidad portante:** La capacidad portante del suelo en condición estática y dinámica utilizando columnas de grava como solución geotécnica mostraron una mejora representativa, sobre todo en condición estática. Por otro lado, los resultados utilizando inyección de estabilizadores químicos resultaron ser más elevados tanto en condición estática como dinámica, esto anterior debido a la gran mejora de los parámetros de resistencia que obtiene el suelo al utilizar inyección de estabilizadores químicos.

6.2 Contrastación de las hipótesis específicas

Columnas de Grava: Con respecto a la hipótesis que afirma que las columnas de grava mejoran el comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales, los resultados indican que, si bien la cohesión y la resistencia al cortante del suelo disminuyen ligeramente, el ángulo de fricción y los valores de "N de campo" aumentan considerablemente en todas las profundidades. Por ello en temas de licuefacción se obtuvo una mitigación en todos los estratos analizados, reduciendo la probabilidad de licuación en todo el perfil estratigráfico. Respecto a la capacidad de soporte del suelo, se obtuvo una ganancia aceptable de resistencia en condición estática y dinámica.

Inyección de Estabilizadores Químicos: En relación con la hipótesis que sostiene que la inyección de estabilizadores químicos mejora el comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales, los resultados muestran que todos los parámetros del suelo, incluido el "N de campo", mejoran significativamente en comparación con los valores originales. Sin embargo, en términos de "N de campo", las columnas de grava siguen siendo superiores. Por ello en temas de licuefacción se obtuvo poca mejora, mitigando solo en 1 metro la condición de licuación del suelo; a diferencia de la capacidad portante, donde se obtuvo un aumento significativo de resistencia en condición estática y dinámica, siendo estas últimas muy superiores a las obtenidas por columna de grava.

CONCLUSIONES

1. La aplicación de soluciones geotécnicas en suelos potencialmente licuables de Talara, Piura, mediante columnas de grava o inyección de estabilizadores químicos, ha demostrado ser fundamental para mejorar las propiedades mecánicas y la resistencia de estos suelos. La inyección de estabilizadores químicos, en particular, ha mostrado un impacto significativo, con un incremento de aproximadamente 306.10% en la capacidad portante estática y un aumento del 227.66% en la capacidad portante dinámica en comparación con el suelo sin tratamiento. Estos porcentajes reflejan la eficacia de las soluciones geotécnicas en la transformación de suelos previamente considerados desafiantes para la construcción, en suelos más estables y seguros para cimentaciones superficiales.
2. Las columnas de grava, al ser implementadas como una solución geotécnica, han demostrado tener un impacto considerable en la resistencia del suelo contra la licuefacción. Esta técnica ha logrado un aumento impresionante del 775% en los valores de "N de campo" a 1 metro de profundidad (Tabla 27). Aunque las columnas de grava no lograron mejorar significativamente otros parámetros como la cohesión y resistencia al cortante, su capacidad para aumentar la resistencia del suelo, especialmente en zonas propensas a la licuefacción, es innegable. Esta mejora es esencial para garantizar la estabilidad de estructuras y cimentaciones en áreas con alto riesgo sísmico.
3. La técnica de inyección de estabilizadores químicos ha emergido como una solución geotécnica altamente efectiva, mostrando mejoras integrales en las propiedades mecánicas del suelo. Esta técnica ha resultado en un incremento notable de 83.863% en resistencia al cortante (Tabla 28), lo que indica una mayor estabilidad y resistencia del suelo contra desplazamientos y deformaciones. Además, la densidad del suelo también mostró un aumento, lo que sugiere una consolidación y densificación significativas del suelo. A pesar de estos beneficios, es crucial considerar que, en términos de "N de campo", las columnas de grava presentaron valores superiores, lo que indica la necesidad de una evaluación cuidadosa al seleccionar la técnica de mejora adecuada según las condiciones y requerimientos específicos del sitio.

RECOMENDACIONES

1. Dada la eficacia demostrada de las soluciones geotécnicas en la mejora de las propiedades mecánicas de suelos potencialmente licuables, se recomienda considerar la implementación de estas técnicas, especialmente la inyección de estabilizadores químicos, en proyectos de construcción ubicados en zonas de alto riesgo sísmico. Es esencial realizar estudios geotécnicos previos para determinar la solución más adecuada según las características específicas del suelo y las demandas del proyecto.
2. Ante la notable mejora en la resistencia del suelo contra la licuefacción proporcionada por las columnas de grava, se sugiere su implementación en áreas donde la licuefacción es una preocupación primordial. Sin embargo, es crucial complementar esta técnica con estudios detallados sobre otros parámetros del suelo, como la cohesión y resistencia al cortante, para garantizar una solución geotécnica integral que aborde todas las problemáticas del suelo.
3. La inyección de estabilizadores químicos ha mostrado ser una solución geotécnica altamente efectiva en la mejora integral de las propiedades mecánicas del suelo. Se recomienda su uso en proyectos donde se requiera una mejora significativa en la resistencia al cortante y la densidad del suelo. No obstante, es esencial comparar los beneficios de esta técnica con los de las columnas de grava, especialmente en términos de "N de campo", para seleccionar la técnica más adecuada según las condiciones del sitio y los objetivos del proyecto.
4. Dada la naturaleza del estudio y la relevancia de la licuefacción del suelo y la capacidad portante del suelo en condición dinámica en el campo de la ingeniería civil, se recomienda la integración de estos temas en el currículo académico de los programas de ingeniería civil. Los futuros ingenieros deben estar equipados con el conocimiento y las habilidades necesarias para abordar los desafíos asociados con estos fenómenos geotécnicos críticos. Además, se sugiere la realización de talleres, seminarios y laboratorios prácticos que permitan a los estudiantes y profesionales en ejercicio entender mejor los métodos de mitigación de la licuefacción del suelo, la evaluación de la capacidad portante en condiciones dinámicas, así como las últimas investigaciones y desarrollos en estos campos. Esto no solo fortalecerá el conocimiento y la comprensión de los estudiantes sobre estos fenómenos críticos, sino que también preparará mejor a los futuros ingenieros para enfrentar los desafíos en el campo profesional y contribuirá a la construcción de estructuras más seguras y resilientes frente a eventos sísmicos.

REFERENCIAS

- Apriyanti, Y., Fahriani, F., & Fauzan, H. (2019). Use of Gypsum Waste and Tin Tailings as Stabilization Materials for Clay to Improve Quality of Subgrade. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 353(1), 012042. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/353/1/012042>.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (1998). Estudios Geotécnicos (NSR-98).
- Ayasca Ilizarbe, C. M., & Quispe Salvatierra, J. C. (2022). Geomallas y columnas de gravas para suelos de baja capacidad portante bajo cimentaciones superficiales en edificación de Salud [Tesis de pregrado]. Universidad Ricardo Palma, Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Civil.
- Bautista Prada, D. A., & Mayorga Murillo, E. D. (2018). Análisis del mejoramiento de suelos empleando el método de columnas de grava [Tesis de pregrado]. Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga, Escuela de Ingeniería.
- Bellido Garcia, J.; Camayo Romero, Y. (2022). Análisis del potencial de licuación para mejorar los suelos arenosos en el sector de Lomo de Corvina - Villa el Salvador. ORCID: 0000-0002-9686-0587; ORCID: 0000-0002-3212-2817.
- Braja M. Das. (2016). **Principles of Foundation Engineering**. Dean Emeritus, California State University, Sacramento, USA.
- Braja M. Das; Ramana, G. V. (2011). **Principles of Soil Dynamics**. Dean Emeritus, California State University, Sacramento, USA.
- CABEZAS CHÁVEZ, E.; SERRATO CHAGUALA, Y. (2019). Evaluación de la resistencia de un suelo grueso reforzado con fibras de coco (cocotero, cocos nucifera).
- Chumacero Agurto, K.; Flores Jimenez, F. (2022). Análisis del potencial de licuación de suelos para determinar la vulnerabilidad en el asentamiento humano la Primavera, Castilla, Piura. ORCID: 0000-0002-0054-4396; ORCID: 0000-0002-7117-5516.
- Crisanto Alberca, J. (2020). Capacidades admisibles de los suelos mediante análisis granulométrico para cimentaciones superficiales en la ciudad de Piura. ORCID: 0000-0001-6709-5161.
- Diana P, VELANDIA; Lesly N, LOPEZ. (2019). Variación de las propiedades fisicoquímicas de los suelos del depósito lacustre de la Ciudad de Tunja, Zona

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
<https://doi.org/10.3233/STAL190301>.

- Dr. Ing. Alva Hurtado, J. (2011). *Diseño de cimentaciones*. Instituto de la construcción y gerencia.
- Estudio de Mecánica de Suelos. (2021). Servicio de ingeniería, suministro y construcción de dos tanques de 163mb para almacenamiento de diesel en refinería Talara.
- Falla Rufasto, P. C. (2021). Propuesta de Mejoramiento de suelos licuables mediante el uso de columnas de grava en áreas portuarias – Puerto del Callao (Anexo 8.4, Potencial de licuefacción sin columna de grava: Metodología Seed & Idriss) [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas].
- Fernandez Silva, J. I., & Vasquez Diaz, N. E. (2022). Método de inyección mortero para mejorar suelos potencialmente licuables, Santa Rosa, Lambayeque. 2019. Universidad Señor de Sipán.
- Fernández-Diéguez, L., Bandera-Cuñat, I., Guardado-Lacaba, R., & Oliva-Álvarez, R. (2017). Susceptibilidad a la licuefacción de los suelos en la ciudad de Caimanera, Guantánamo. *Minería y Geología*, 33(1), 26-43.
- Flores, F. A., Arroyo, J., De la Fuente, H., Bernal, E., & Aguirre, J. L. (2022). Mitigación del riesgo de licuefacción en tanques de almacenamiento mediante Columnas de Grava Compactada. XXXI Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica.
- Forcellini, D. (2020). Soil-structure interaction analyses of shallow-founded structures on a potential-liquefiable soil deposit. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106108>.
- García, M; Manzanal, D; Carvajal, E. (2017) . Análisis de licuefacción y mitigación con columnas de grava. *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges*. <https://doi.org/10.3233/STAL190277>.
- Gonzabay Carvajal, J. A. (2019). Análisis y diseño de cimentación para tanques metálicos de almacenamiento de derivados del petróleo y para base de bomba, de suelos característicos de la refinería La Libertad [Proyecto de investigación previo a la obtención del título de ingeniero civil, Universidad Estatal Península de Santa Elena, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, La Libertad, Ecuador].
- Instituto geofísico del Perú. (2020). PROGRAMA PRESUPUESTAL N° 068: REDUCCIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS POR DESASTRES.

- Jorge, Lozano S. (2020). Diseño estructural de puente peatonal en Guadua (*Angustifolia Kunth*) en la localidad de ciudad Bolívar – Barrio los Sauces. Universidad católica de Colombia.
- Monforte, L., Gens, A., Arroyo, M., Mánica, M., & Carbonell, J. M. (2021). Analysis of cone penetration in brittle liquefiable soils. **Computers and Geotechnics**, 134. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104123>.
- Mondragon Zurita, A. O. (2022). Estimación de la capacidad portante de un suelo cohesivo a través del ensayo SPT, elementos finitos y métodos analíticos de Terzaghi y Meyerhof [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional de la UPN.
- Ochoa-Cornejo, F. y Muñoz, S. (2017). Laponite: a nanotechnology that retards liquefaction. **Obras y Proyectos** 21, 6-12. ORCID: 0000-0002-9686-0587; ORCID: 0000-0002-3212-2817.
- Orozco, K. y Seminario, L. (2020). Estudio de métodos de prevención y mitigación contra la licuefacción en los suelos de Piura [Tesis para optar el título de Ingeniero Civil]. Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.
- Ortiz-Hernández, E., Chunga, K., Pastor, J. L., & Toulkeridis, T. (2022). Assessing susceptibility to soil liquefaction using the standard penetration test (SPT)—A case study from the city of portoviejo, coastal ecuador. **Land**, 11(4). <https://doi.org/10.3390/land11040463>.
- Ortiz-Hernández, E., Chunga, K., Toulkeridis, T., & Pastor, J. L. (2022). Soil liquefaction and other seismic-associated phenomena in the city of chone during the 2016 earthquake of coastal ecuador. **Applied Sciences (Switzerland)**, 12(15). <https://doi.org/10.3390/app1215786>.
- Otoya Ipanaque, J. M., Pérez Alcántara, J. S. (2020). Evaluación estructural del anillo de cimentación del tanque N°-14 para su adecuación al DS-017-2013-EM en las operaciones de almacenamiento de combustible diésel B5-S50, Chimbote [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional UPN.
- Pollán, José Antonio. (2014). Diseño basado en técnicas de fiabilidad del tratamiento de mejora del terreno mediante columnas de grava. Universidad Politécnica de Madrid.

- Quipuzcoa Horna, M. del C. (2020). Análisis de licuación de suelos en franjas costeras: una revisión sistemática entre 2010-2020 [Trabajo de investigación, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional UPN.
- Rios Hidalgo, A; Rojas Vizarres, J. (2020). Mejoramiento de suelo en zona susceptible a licuefacción utilizando inclusiones, intercambio vial aeropuerto Chincheros – Cusco. Universidad Ricardo Palma.
- Rivera Chura, I. (2020). Impacto de los estabilizadores químicos en las propiedades mecánicas de un suelo expandible en la urbanización Santa María IV Etapa Trujillo [Tesis de pregrado]. Universidad Privada de Trujillo, Carrera Profesional de Ingeniería Civil, Trujillo, Perú.
- Ruiz Ortiz, S.; Pineda Alcala, E. (2022). Análisis de la mitigación de licuefacción del suelo aplicando el diseño de columnas de grava compactada en el Colegio Jacobo, Catacaos, Piura, Perú 2022.
- Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción. (2020). Suelos y Cimentaciones (E.050). Publicación Oficial. www.gob.pe/sencico.
- Subedi, M., & Acharya, I. P. (2022). Liquefaction hazard assessment and ground failure probability analysis in the kathmandu valley of nepal. **Geoenvironmental Disasters**, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s40677-021-00203-0>.
- Tefera, N. K., Melese, D. T., Bafena, H. T., & Negesa, A. B. (2023). Evaluating the effectiveness of nonwoven geotextile-encased cinder gravel column in improving load-bearing and deformation characteristics of soft clay. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/1753757>.
- Verdugo, R; González, J. (2019). Efecto de la magnitud del sismo en la ocurrencia de licuefacción. **Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges**. <https://doi.org/10.3233/STAL190277>.
- Villar Sandoval, D. V. (2021). Planificación y procedimiento constructivo para la fabricación y montaje de un tanque de 5000 m³ para almacenamiento de etanol basado en la norma API 650-2017 en el terminal de líquidos Tramarsa-Paita [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional de la UPN.
- Zeybek, A., & Madabhushi, G. S. P. (2017). Durability of partial saturation to counteract liquefaction. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement**, 170(2), 102-111. <https://doi.org/10.1680/jgrim.16.00025>.

ANEXOS

ANEXO A: Operacionalización de variables

OPERACIONALIZACION DE LAS VARIABLES										
Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Índices	Unidad de Medida	Escala	Instrumento	Herramientas	Ítems
Soluciones Geotécnicas	Técnicas y métodos para mejorar el comportamiento mecánico de suelos potencialmente licuables en cimentaciones superficiales	Implementación de técnicas específicas de mejoramiento del suelo en un sitio seleccionado	Columna de grava	Resistencia al corte, densidad, porosidad, permeabilidad, deformación, asentamiento	Esfuerzos máximos, vacíos, estabilidad	kg/cm ²	Cuantitativo	Observación directa, pruebas de laboratorio, ensayos in situ	Penetrómetro, sismógrafo, piezómetro, equipo de compactación, equipo de perforación	Técnica utilizada (nominal), cantidad de material utilizado (razón), profundidad de aplicación (intervalo), tiempo de implementación (intervalo)
		Tipo de técnica utilizada se refiere a la elección de uno o varios métodos de mejoramiento del suelo para aumentar su capacidad de soporte y disminuir su susceptibilidad a la licuefacción.	Técnica de inyección de estabilizadores químicos	Resistencia al corte, densidad, porosidad, permeabilidad, deformación, asentamiento, estabilidad	Índice de plasticidad, índice de consistencia, relación de vacíos	Unidad/unidad	Adimensional	Adición de mortero	Penetrómetro, sismógrafo, piezómetro, equipo de compactación, equipo de perforación	Técnica utilizada (nominal), cantidad de material utilizado (razón)
Comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales	Se refiere a cómo las cimentaciones superficiales responden a las cargas y al entorno, especialmente en suelos potencialmente licuables	Evaluación de la respuesta de las cimentaciones superficiales a las cargas y al entorno después de la aplicación de soluciones geotécnicas	Capacidad portante	Resistencia al corte, asentamiento, deformación, estabilidad	Esfuerzos máximos, deformaciones, asentamientos	kg/cm ² , mm	Cuantitativo	Observación directa, pruebas de laboratorio, ensayos in situ	Penetrómetro, sismógrafo, piezómetro, equipo de compactación, equipo de perforación	Capacidad portante (razón)
		La deformación se refiere a los cambios en la forma o tamaño de la cimentación superficial debido a las cargas o al entorno.	Deformación	Deformación elástica, deformación plástica	Deformaciones	mm	Cuantitativo	Observación directa, pruebas de laboratorio, ensayos in situ	Penetrómetro, sismógrafo, piezómetro, equipo de compactación, equipo de perforación	Deformación elástica (intervalo), deformación plástica (intervalo)
		La resistencia al corte de un suelo se refiere a la capacidad máxima de un suelo para resistir fuerzas de corte sin fallar o deslizarse.	Resistencia al corte	Factor de seguridad contra la falla, resistencia al corte residual	Factores de seguridad, resistencias residuales	Adimensional, kg/cm ²	Cuantitativo	Observación directa, pruebas de laboratorio, ensayos in situ	Penetrómetro, sismógrafo, piezómetro, medidor de asentamiento, equipo de compactación, equipo de perforación	Factor de seguridad contra la falla (razón), resistencia al corte residual (razón)

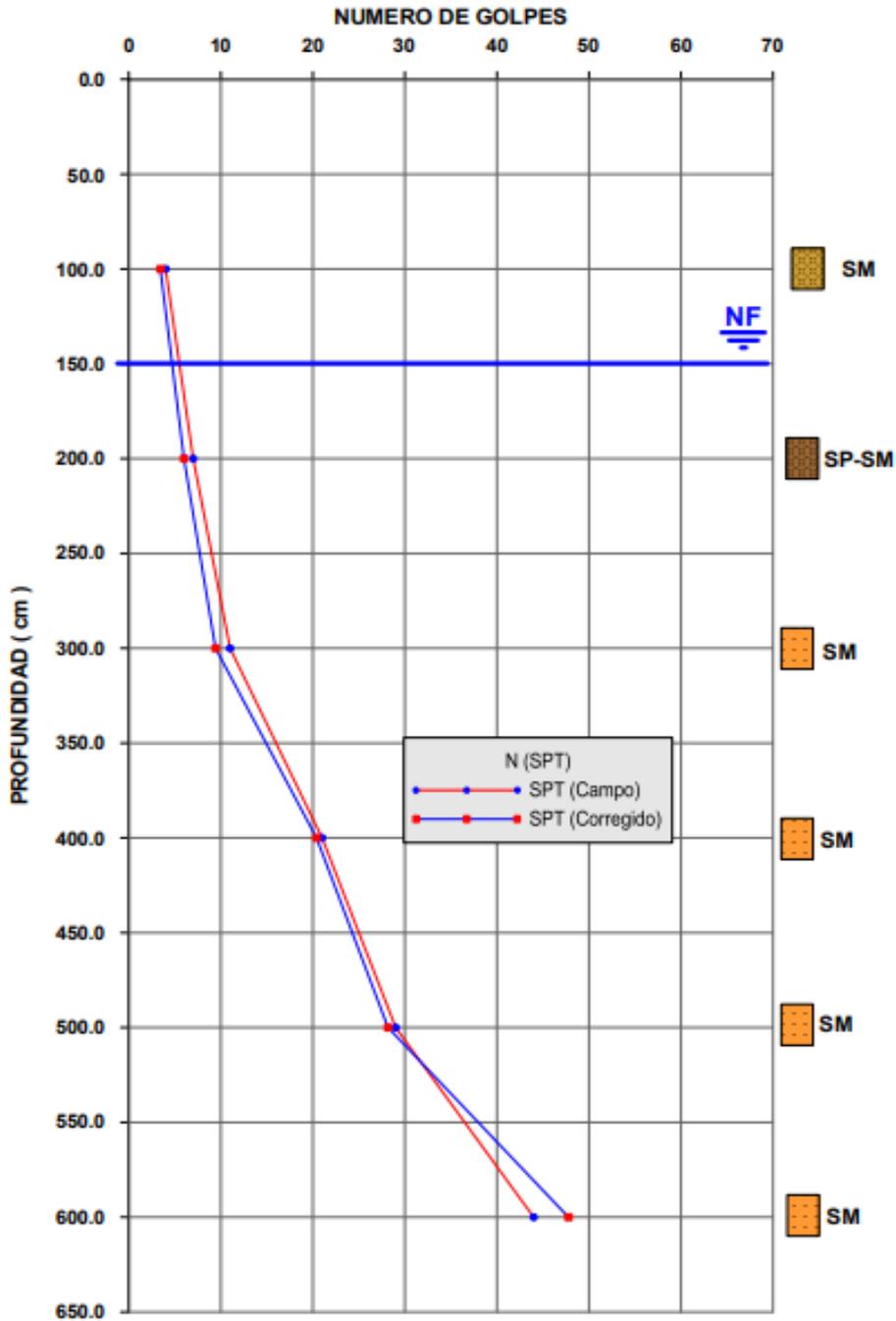
ANEXO B: Matriz de Consistencia

TEMA:	SOLUCIONES GEOTÉCNICAS APLICADAS A SUELOS POTENCIALMENTE LICUABLES PARA MEJORAR EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES				
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variable Independiente	Indicadores	Metodología
¿Cómo serán las soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables para mejorar el comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales?	Comparar las soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables para mejorar el comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales.	Al comparar las soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables se definió una óptima solución geotécnica la cual mejora el comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales.	Soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables	Índice de licuefacción Resistencia al corte Asentamiento diferencial	Revisión de literatura Análisis de datos
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas	Variable Dependiente	Indicadores	Metodología
¿Cómo serán las soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables empleando columnas de grava como método de mejora del suelo para mejorar el comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales?	Analizar las soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables empleando columnas de grava como método de mejora del suelo para mejorar el comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales.	Al analizar las soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables empleando columnas de grava como método de mejora del suelo se mejoró el comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales.	Comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales	-Densidad relativa de las columnas de grava -Reducción de la presión de poros -Incremento de la capacidad portante	Recopilación de datos sobre columnas de grava Análisis de los efectos de las columnas de grava
¿Cómo serán las soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables empleando técnicas de inyección de estabilizadores químicos para mejorar el comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales?	Analizar las soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables empleando técnicas de inyección de estabilizadores químicos para mejorar el comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales.	Al analizar las soluciones geotécnicas aplicadas a suelos potencialmente licuables empleando técnicas de inyección de estabilizadores químicos se mejoró el comportamiento mecánico en cimentaciones superficiales.		-Penetración de los estabilizadores químicos -Reducción de la permeabilidad -Incremento de la resistencia a la compresión uniaxial	Recopilación de datos sobre la inyección de estabilizadores químicos Análisis de los efectos de la inyección de estabilizadores químicos

ANEXO C: “Servicio de consultoría para la supervisión del servicio de ingeniería, suministro y construcción de tanques para almacenamiento de Diesel en refinería Talara”

EVALUACION DEL SUELO DE CIMENTACION DEL TANQUE 295

SPT 01



Nota: Pagina 38 del informe de mecánica de suelos

En vista de lo mencionado se analizará los parámetros de resistencia del suelo de cimentación del tipo arenas mal graduadas con finos limosos del tipo SP-SM, en estado medianamente denso en su condición más crítica (saturado) por la presencia del nivel freático a 1.5m, obteniéndose la resistencia del suelo última y admisible por los métodos conocidos de capacidad de carga.

SUELO DE APOYO: ARENA POBREMENTE GRADADA CON LIMOS (SP-SM)

ϕ	=	32.6°
c	=	0.10 Kg/cm ²
γ_1	=	1,70 ton/m ³
γ_2	=	1,75 ton/m ³
Es	=	175 Kg/cm ²
μ	=	0,35
Df	=	2.0 m.

Nota: Página 73 del informe de mecánica de suelos

De acuerdo a la historia sísmica estudiada por el Dr. Silgado (1973) la zona en estudio presenta alta sismicidad. El subsuelo donde se proyecta cimentar las estructuras del nuevo TANQUE 295, de almacenamiento de Combustible Diesel, tendrán un comportamiento sísmico desfavorable y según el reglamento nacional de construcciones estos suelos se clasifican como tipo S2, con período predominante Ts igual a 0.6 segundos con un factor de amplificación sísmica de 1.05 y $a_{max} = 0.45$ g.

Nota: Página 74 del informe de mecánica de suelos

ANEXO D: Autorización para utilizar datos en investigación académica.



AUTORIZACIÓN PARA UTILIZAR DATOS EN INVESTIGACIÓN ACADÉMICA

Estimado Leonel Alexander Hinojosa Palomino,

Quien suscribe, como jefe del Departamento técnico de IDETEC DEL PERU SAC, luego de revisar vuestra solicitud presentada en relación al uso de datos específicos obtenidos de Estudio de Mecánica de Suelos (EMS), por la presente le comunicamos que nuestra empresa autoriza lo solicitado por usted su trabajo de investigación (Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero), siempre que se cumpla con los siguientes requisitos:

- La información proporcionada debe ser utilizada exclusivamente con fines académicos y de investigación (Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero)
- La información esta referida estrictamente a datos necesarios para vuestra investigación, según lo límites de la tesis.
- El informe resultante de su investigación no será utilizado para fines comerciales ni será compartida en medios de difusión públicas, sin el consentimiento previo de IDETEC DEL PERU SAC.

Como es de vuestro conocimiento, nuestra empresa está comprometida con el desarrollo de la ingeniería y la investigación; por lo que le auguramos desde ya los mejores éxitos.

Atentamente,




DAVID DÁVILA BALLENA
JEFE DEPARTAMENTO
TÉCNICO DE PROYECTOS

Ing. David Ysaías Dávila Ballena
Jefe del Departamento Técnico
IDETEC DEL PERU SAC

Santiago de Surco, 23 de octubre de 2023.