



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**

**Universidad del Perú. Decana de América**

**Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica**

**Escuela Profesional de Ingeniería Geológica**

**Uso del CPTu y la estadística en la evaluación del  
impacto de la concentración de sólidos y del potencial a  
la licuefacción estática en las playas de relaves**

**TESIS**

**Para optar el Título Profesional de Ingeniero Geólogo**

**AUTOR**

**Fiorella Alejandra CHÁVEZ COBEÑAS**

**ASESOR**

**Mg. Felix Abraham CORNELIO ORBEGOSO**

**Lima, Perú**

**2024**



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

## Referencia bibliográfica

---

Chávez, F. (2024). *Uso del CPTu y la estadística en la evaluación del impacto de la concentración de sólidos y del potencial a la licuefacción estática en las playas de relaves*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Geológica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

---

## Metadatos complementarios

| Datos de autor                   |                                                                                           |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nombres y apellidos              | Fiorella Alejandra Chávez Cobeñas                                                         |
| Tipo de documento de identidad   | DNI                                                                                       |
| Número de documento de identidad | 72746872                                                                                  |
| URL de ORCID                     | <a href="https://orcid.org/0009-0006-9643-1666">https://orcid.org/0009-0006-9643-1666</a> |
| Datos de asesor                  |                                                                                           |
| Nombres y apellidos              | Felix Abraham Cornelio Orbegoso                                                           |
| Tipo de documento de identidad   | DNI                                                                                       |
| Número de documento de identidad | 42652078                                                                                  |
| URL de ORCID                     | <a href="https://orcid.org/0000-0001-5532-6209">https://orcid.org/0000-0001-5532-6209</a> |
| Datos del jurado                 |                                                                                           |
| Presidente del jurado            |                                                                                           |
| Nombres y apellidos              | Diana Pajuelo Aparicio                                                                    |
| Tipo de documento                | DNI                                                                                       |
| Número de documento de identidad | 43540870                                                                                  |
| Miembro del jurado 1             |                                                                                           |
| Nombres y apellidos              | Christian Augusto Hurtado Enríquez                                                        |
| Tipo de documento                | DNI                                                                                       |
| Número de documento de identidad | 45585445                                                                                  |
| Miembro del jurado 2             |                                                                                           |
| Nombres y apellidos              | Pedro Antonio Olivares Ballena                                                            |
| Tipo de documento                | DNI                                                                                       |
| Número de documento de identidad | 06085689                                                                                  |
| Datos de investigación           |                                                                                           |

|                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Línea de investigación                                 | C.0.3.30. Geotecnia aplicada a la Ingeniería Civil                                                                                                                                                                                                  |
| Grupo de investigación                                 | No aplica.                                                                                                                                                                                                                                          |
| Agencia de financiamiento                              | Perú. Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e innovación Tecnología. Beneficio Tributario para empresas innovadoras. Expediente virtual 00000507F                                                                                                 |
| Ubicación geográfica de la investigación               | Edificio: Universidad Nacional Mayor de San Marcos<br>País: Perú<br>Departamento: Lima<br>Provincia: Lima<br>Distrito: Lima<br>Centro poblado: -<br>Urbanización: -<br>Manzana y lote: -<br>Calle: -<br>Latitud: -12.056423<br>Longitud: -77.084333 |
| Año o rango de años en que se realizó la investigación | Febrero 2022 - febrero 2023                                                                                                                                                                                                                         |
| URL de disciplinas OCDE                                | Geotecnia<br><a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.02">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.02</a><br>Ingeniería civil<br><a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01</a>         |



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**  
Universidad del Perú. Decana de América  
**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA**  
Escuela Profesional de Ingeniería Geológica

## **ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓLOGO**

En el salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, el viernes 16 de febrero del año 2024 siendo las 3:00 pm, en presencia de los señores docentes designados como miembros de Jurado Calificador:

|                                        |                        |
|----------------------------------------|------------------------|
| Mg. Diana Pajuelo Aparicio             | (Presidente de Jurado) |
| Mg. Christian Augusto Hurtado Enríquez | (Miembro de Jurado)    |
| Ing. Pedro Antonio Olivares Ballena    | (Miembro de Jurado)    |

Reunidos para el acto académico público de colación de la Tesis de la Bach. **Fiorella Alejandra Chávez Cobeñas**, quien sustentará la Tesis titulada: **"Uso del CPTu y la estadística en la evaluación del impacto de la concentración de sólidos y del potencial a la licuefacción estática en las playas de relaves"**; su asesor el docente **Mg. Felix Abraham Cornelio Orbegoso**, para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Geólogo.

Los miembros del Jurado, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas:

A SATISFACCIÓN DEL JURADO

El Jurado procedió a la calificación, cuyo resultado fue:

APROBADO POR UNANIMIDAD CON NOTA 16 (DIECISEIS)

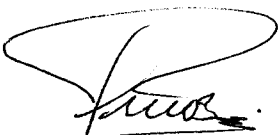
Habiendo sido aprobada la sustentación de Tesis por el Jurado Calificador, el presidente recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, proponga se le otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓLOGO** a la Bach. **Fiorella Alejandra Chávez Cobeñas**.

Siendo las 15:40 horas se dio por concluido el acto académico, expidiéndose dos (02) Actas originales de la Sustentación de la Tesis.

Lima, 16 de febrero de 2024

  
**MG. DIANA PAJUELO APARICIO**  
PRESIDENTE DE JURADO

  
**MG. CHRISTIAN AUGUSTO HURTADO ENRÍQUEZ**  
MIEMBRO DE JURADO

  
**ING. PEDRO ANTONIO OLIVARES BALLENA**  
MIEMBRO DE JURADO

  
**MG. FELIX ABRAHAM CORNELIO ORBEGOSO**  
MIEMBRO ASESOR



### CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo Felix Abraham Cornelio Orbegoso en mi condición de asesor acreditado con la

Resolución Decanal N° 001274-2023-D-FIGMMG/UNMSM de la

tesis/monografía/informe de investigación/trabajo académico, cuyo título es .....

"USO DEL CPTU Y LA ESTADÍSTICA EN LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS Y DEL POTENCIAL A LA LICUEFACCIÓN ESTÁTICA EN LAS PLAYAS DE RELAVES"

presentado por el bachiller/magíster/egresado/licenciado/estudiante FIORELLA ALEJANDRA CHÁVEZ CORBEÑAS

para optar el grado/título/especialidad de INGENIERO GEOLOGO

CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante el software de similitud textual, el documento evaluado cuenta con el porcentaje de <sup>4</sup>...% de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del grado/ título/ especialidad correspondiente.

Firma del Asesor \_\_\_\_\_

DNI: 42652078

Nombres y apellidos del asesor:

Felix Abraham Cornelio Orbegoso



## **DEDICATORIA**

A mis abuelos Meche, Victoria y José, que en paz descansen, sé que estarían muy felices y orgullosos de mí.

A mi familia, por siempre darme un hogar lleno de amor, confianza y apoyo incondicional.

A mi padre Marco Antonio Chávez Esteves, por ser un ejemplo de esfuerzo, perseverancia y superación, por sus enseñanzas, por plasmar cada día que la salud y la educación son unas de las cosas más valiosas que pueda tener un ser humano.

A mi madre, Ana Beatriz Cobeñas Alejandro, por ser mi alegría e inspiración, por apoyarme incondicionalmente, motivarme, orientarme, amarme y nunca abandonarme desde el día que llegué a su vida.

A mi hermana, Ana Claudia Fernanda Chávez Cobeñas, por acompañarme en cada etapa de mi vida, por ser mi orgullo, motivación, alegría y amor.

A mis mascotas Layla y Morita que con sus ocurrencias y travesuras ayudaron a alegrar los momentos de tensión y preocupación.

Y finalmente a todos mis amigos, aquellos que me conocieron desde mi niñez, aquellos que conocí hace unos años, amistades del colegio, academia, universidad y centro laboral, a todos ellos, por confiar, creer en mi capacidad y darme la motivación en esta etapa de mi vida profesional.

## **AGRADECIMIENTOS**

La tesis para obtener el título de ingeniera geóloga, “Uso del CPTu y la estadística en la evaluación del impacto de la concentración de sólidos y del potencial a la licuefacción estática en las playas de relaves”, no habría sido posible sin el apoyo de la empresa en investigación geotécnica ConeTec Perú S.A.C., por ende estoy completamente agradecida con el gerente general Mayu Alberto Tincopa Heredia, quien me brindó la oportunidad de desarrollar esta investigación.

Agradezco infinitamente a mi familia quienes fueron el pilar de mi educación, por inculcarme valores y dejarme como enseñanza que con esfuerzo y dedicación uno puede lograr lo que se propone, gracias por permitirme regalarles felicidad y sonrisas con cada logro en mi vida académica y profesional. A mis asesores, el MsC. Felix Abraham Cornelio Orbegoso y el PhD. Mayu Alberto Tincopa Heredia, por su orientación, exigencia y constante apoyo en cada avance de esta tesis, a mis amigos más allegados y compañeros de trabajo quienes me motivaban cada día a finalizar esta investigación; a los docentes de mi querida Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de mi alma mater la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por brindarme los conocimientos que esta hermosa profesión abarca y por las lecciones de vida que quedaron grabadas en mí hasta el final de mis días.

## TABLA DE CONTENIDO

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| RESUMEN .....                                   | 14 |
| Capítulo I. Introducción .....                  | 15 |
| 1.1. Introducción .....                         | 15 |
| 1.2. Planteamiento del problema .....           | 17 |
| 1.3. Formulación del problema .....             | 18 |
| 1.3.1. General .....                            | 18 |
| 1.3.2. Específicos .....                        | 18 |
| 1.4. Objetivos de la investigación .....        | 19 |
| 1.4.1. Objetivo general .....                   | 19 |
| 1.4.2. Objetivos específicos .....              | 19 |
| Capítulo II. Generalidades .....                | 20 |
| 2.1. Base de datos .....                        | 20 |
| 2.2. Estado del arte. ....                      | 20 |
| 2.2.1. Wels et al. (2000). ....                 | 20 |
| 2.2.2. Robertson (2010). ....                   | 20 |
| 2.2.3. Robertson (2016). ....                   | 20 |
| 2.2.4. Mayne, P. et al. (2019). ....            | 21 |
| 2.2.5. Burdano (2021). ....                     | 21 |
| 2.2.6. Morales et al. (2021). ....              | 21 |
| 2.3. Marco Teórico Metalúrgico-Geotécnico ..... | 22 |

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.1. Relaves. ....                                                                                                          | 22 |
| 2.3.2. Depósitos de relaves.....                                                                                              | 22 |
| 2.3.3. Tipos de relaves.....                                                                                                  | 22 |
| 2.3.3.1. Relaves pulpa. ....                                                                                                  | 23 |
| 2.3.3.2. Relaves espesados.....                                                                                               | 23 |
| 2.3.3.3. Relaves en pasta.....                                                                                                | 23 |
| 2.3.3.4. Relaves filtrados.....                                                                                               | 23 |
| 2.3.4. Colapso o fallamiento .....                                                                                            | 23 |
| 2.3.5. Gravedad específica. ....                                                                                              | 24 |
| 2.3.6. Cone Penetration Test o Ensayo de Piezocono (CPTu). ....                                                               | 24 |
| 2.3.6.1. Parámetros geotécnicos.....                                                                                          | 26 |
| a. Resistencia total de punta corregida ( $q_t$ ). (ASTM D5778-20, 2020).....                                                 | 26 |
| b. Resistencia de fricción del fuste ( $f_s$ ). (ASTM D5778-20, 2020).....                                                    | 27 |
| c. Tasa de fricción ( $R_f$ ). (ASTM D5778-20, 2020) .....                                                                    | 27 |
| d. Presión intersticial ( $u_2$ ). (ASTM D5778-20, 2020).....                                                                 | 27 |
| e. Índice de comportamiento de suelo ( $I_c$ ) .....                                                                          | 28 |
| f. Índice de tipo de comportamiento del suelo modificado ( $I_B$ ). (Robertson & Cabal, 2022).....                            | 28 |
| g. Límite contractivo-dilatante (CD). (Robertson & Cabal, 2022) .....                                                         | 28 |
| h. Resistencia por punta normalizada utilizando un exponente de tensión variable ( $Q_{tn}$ ). (Robertson & Cabal, 2022)..... | 28 |

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| i. Tasa de fricción normalizada ( $F_r$ ). (ASTM D5778-20, 2020) .....               | 29 |
| j. Peso unitario del suelo ( $\gamma$ ).....                                         | 30 |
| k. Parámetro de estado ( $\psi$ ) .....                                              | 30 |
| l. Resistencia normalizada equivalente del cono de arena limpia ( $Q_{tn,cs}$ )..... | 30 |
| m. Conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad ( $k$ ) .....             | 31 |
| 2.3.6.2. Diagramas de Clasificación del Tipo de Suelo. ....                          | 32 |
| a. Diagrama SBTn en base al $Q_{tn}$ y $F_r$ (Robertson P. K., 2010).....            | 32 |
| b. Diagrama SBTn en base al $Q_{tn}$ y $F_r$ (Robertson & Cabal, 2015) .....         | 34 |
| c. Diagrama SBTn en base al $Q_{tn}$ y $F_r$ (Robertson P. K., 2016).....            | 34 |
| 2.4. Marco Teórico Estadístico. ....                                                 | 36 |
| 2.4.1. ¿Qué es la estadística?.....                                                  | 36 |
| 2.4.2. Medidas de tendencia central. ....                                            | 37 |
| 2.4.2.1. Media ( $\bar{X}$ ).....                                                    | 37 |
| 2.4.2.2. Mediana ( $X$ ). ....                                                       | 37 |
| 2.4.2.3. Moda ( $X$ ).....                                                           | 38 |
| 2.4.3. Prueba de normalidad.....                                                     | 39 |
| 2.4.3.1. La prueba de Kolmogorov-Smirnov con corrección de Liliefors.....            | 39 |
| 2.4.3.2. La prueba de Shapiro-Wilk.....                                              | 40 |
| 2.4.4. Transformaciones no lineales.....                                             | 41 |
| 2.4.5. Diagrama box plot.....                                                        | 43 |
| 2.4.6. Diagrama de barras apiladas .....                                             | 43 |

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Capítulo III. Hipótesis y variables .....                                                       | 45 |
| 3.1. Hipótesis.....                                                                             | 45 |
| 3.2. Variables.....                                                                             | 45 |
| 3.2.1. Variables dependientes.....                                                              | 45 |
| 3.2.2. Variables independientes .....                                                           | 45 |
| Capítulo IV. Metodología .....                                                                  | 46 |
| 4.1. Ubicación de datos .....                                                                   | 46 |
| 4.2. Población de estudio.....                                                                  | 46 |
| 4.3. Recopilación bibliográfica .....                                                           | 47 |
| 4.4. Muestreo de campo .....                                                                    | 49 |
| 4.5. Procesamiento post campo .....                                                             | 49 |
| 4.6. Análisis de datos.....                                                                     | 50 |
| 4.6.1. Primer Análisis: $Q_{tn}$ , $Fr$ vs $C_p\%$ .....                                        | 50 |
| 4.6.1.1. Análisis según $Q_m$ y $Fr$ , vs $C_p\%$ en el diagrama SBTn del 2010 .....            | 52 |
| 4.6.1.2. Análisis de boxplots y outliers .....                                                  | 52 |
| 4.6.1.3. Análisis de las medidas de tendencia central y dispersión .....                        | 52 |
| 4.6.2. Segundo Análisis: contractivo/dilatante vs $C_p\%$ .....                                 | 53 |
| 4.6.2.1. Análisis del comportamiento contractivo – dilatante con el diagrama SBTn del 2016..... | 53 |
| 4.6.2.2. Análisis del parámetro de estado ( $\psi$ ) con barras 100% apiladas .....             | 53 |
| 4.6.3. Tercer análisis. Comparación con casos históricos y representativos .....                | 54 |

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.6.3.1. Comparación con los resultados en el SBTn del 2016 .....                                                  | 55 |
| 4.6.3.2. Comparación con los resultados del $\psi$ .....                                                           | 55 |
| Capítulo V. Resultados .....                                                                                       | 56 |
| 5.1. Resultados del primer análisis .....                                                                          | 56 |
| 5.1.1. Resultados de los valores de $Q_{tn}$ , $F_r$ vs $C_p\%$ en el diagrama SBTn del 2010 ...                   | 56 |
| 5.1.2. Resultados de boxplots y outliers.....                                                                      | 62 |
| 5.1.3. Resultados de las medidas de tendencia central y de dispersión .....                                        | 67 |
| 5.2. Resultados del segundo análisis .....                                                                         | 71 |
| 5.2.1. Resultados del análisis del comportamiento contractivo – dilatante con el diagrama SBTn del 2016.....       | 71 |
| 5.2.2. Diagrama de barras 100% apiladas para el $\psi$ .....                                                       | 73 |
| 5.3. Resultados del tercer análisis .....                                                                          | 76 |
| 5.3.1. Resultados de la comparación de los valores de $Q_{tn}$ y $F_r$ con casos históricos y representativos..... | 76 |
| 5.3.2. Resultados de la comparación de los valores del $\psi$ con casos históricos y representativos.....          | 80 |
| Capítulo VI. Discusión.....                                                                                        | 82 |
| Capítulo VII. Conclusiones.....                                                                                    | 84 |
| Capítulo VIII. Recomendaciones.....                                                                                | 85 |
| Capítulo IX. Referencias Bibliográficas .....                                                                      | 86 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Estructura del piezocono y las 3 ubicaciones para la presión intersticial (ASTM D5778-20, 2020). .....                                                                                                           | 25 |
| Figura 2. Dimensiones para punta de piezocono de 10 cm <sup>2</sup> y 15 cm <sup>2</sup> . (ASTM D5778-20, 2020).<br>.....                                                                                                 | 26 |
| Figura 3. Diagrama SBTn en base al $Q_m$ y $F_r$ (Robertson P. K., 2010).....                                                                                                                                              | 33 |
| Figura 4. Diagrama SBTn del CPT normalizado, en base al $Q_m$ y $F_r$ (Robertson & Cabal, 2015).<br>.....                                                                                                                  | 34 |
| Figura 5. Diagrama SBTn modificado y publicado por Robertson (2016).....                                                                                                                                                   | 35 |
| Figura 6. Distribución simétrica ( $X = X = X$ ). b. Distribución de cola derecha ( $X > X > X$ ). c.<br>Distribución de cola izquierda ( $X > X > X$ ). En verde $X$ , en azul $X$ y en rojo $X$ .....                    | 39 |
| Figura 7. Ejemplo de las pruebas de normalidad para los datos de la variable V1. Se rechaza la<br>distribución normal por el nivel de significancia con corrección de Liliefors inferior a 5%.<br>Elaboración propia. .... | 40 |
| Figura 8. Ejemplo de histograma con distribución no normal. Elaboración propia. ....                                                                                                                                       | 40 |
| Figura 9. Ejemplo de diagrama Q-Qplot con distribución no normal. Elaboración propia. ....                                                                                                                                 | 40 |
| Figura 10. Ejemplo de diagrama box plot con presencia de outliers. Elaboración propia. ....                                                                                                                                | 41 |
| Figura 11. Diferentes diagramas de dispersión que indican el tipo de relación entre las<br>variables. ....                                                                                                                 | 41 |
| Figura 12. Los 4 tipos de transformaciones para datos que no cumplen con una distribución<br>normal. ....                                                                                                                  | 42 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 13. Comparación de las partes de un box plot y un histograma, con la ubicación de las medidas de tendencia central en una curva asimétrica con cola hacia la izquierda.....                                                                                                    | 43 |
| Figura 14. Diagrama de barras apiladas y 100%. ....                                                                                                                                                                                                                                   | 44 |
| Figura 15. Ubicación de la playa de relaves, [a] vista en perfil (zona 4) y [b] en planta (zona 2, Extraído de: Qingting et al., 2020) y [c] la zona de análisis (área naranja, Extraído de: Wels et al., 2000). ....                                                                 | 46 |
| Figura 17. Distribución de los valores de $Q_m$ y $F_r$ para los relaves “finos” ( $I_c > 2.85$ ) en el diagrama SBTn según el $I_c$ (línea negra). Los colores representan al $C_p\%$ de la Tabla 8 y la línea discontinua azul representa el límite del umbral $I_c = 2.85$ .....   | 60 |
| Figura 18. Distribución de los valores de $Q_m$ y $F_r$ para los relaves “gruesos” ( $I_c < 2.85$ ) en el diagrama SBTn según el $I_c$ (línea negra). Los colores representan al $C_p\%$ de la Tabla 8 y la línea discontinua azul representa el límite del umbral $I_c = 2.85$ ..... | 61 |
| Figura 19. Boxplots de $Q_m$ por $C_p\%$ para relaves finos con outliers. ....                                                                                                                                                                                                        | 63 |
| Figura 20. Boxplots de $F_r$ por $C_p\%$ para relaves finos con outliers.....                                                                                                                                                                                                         | 63 |
| Figura 21. Boxplots de $Q_m$ por $C_p\%$ para relaves gruesos con outliers. ....                                                                                                                                                                                                      | 64 |
| Figura 22. Boxplots de $F_r$ por $C_p\%$ para relaves gruesos con outliers. ....                                                                                                                                                                                                      | 64 |
| Figura 23.Boxplots de los valores de $Q_m$ por $C_p\%$ para relaves finos sin outliers. ....                                                                                                                                                                                          | 66 |
| Figura 24. Boxplots de los valores de $F_r$ por $C_p\%$ para relaves finos sin outliers.....                                                                                                                                                                                          | 66 |
| Figura 25.Boxplots de los valores de $Q_m$ por $C_p\%$ para relaves gruesos sin outliers. ....                                                                                                                                                                                        | 67 |
| Figura 26. Boxplots de los valores de $F_r$ por $C_p\%$ para relaves gruesos sin outliers.....                                                                                                                                                                                        | 67 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 27. Distribución de los valores de $Q_m$ y $F_r$ para los tipos de relaves por $C_p\%$ en el diagrama SBTn según el $I_c$ (líneas grises) e $I_B$ (línea negra). Los colores representan al $C_p\%$ de la Tabla 8 y la línea discontinua negra representa el límite del umbral $I_c=2.85$ . ....                                                                                                          | 72 |
| Figura 28. Diagrama de barras 100 % apiladas con la frecuencia % apilada en el eje vertical principal y el conteo de la frecuencia, con líneas del color que representa al tipo de relave por $C_p\%$ , y en el eje vertical secundario la frecuencia para cada intervalo del $\psi$ . El límite contractivo – dilatante ( $\psi = -0.05 \pm 0.02$ ) se encuentra como una línea discontinua de color negro..... | 74 |
| Figura 29. Gráfico SBTn basado en $Q_m$ - $F_r$ de CPT-N04 en Cadia con los casos históricos de fallas por licuefacción de flujo (estrellas blancas), ejemplos de arenas de relaves (estrellas amarillas), el CPTU-16-03N-R1 en Brumadinho (círculos negros) y datos de un ensayo CPTu de la base de datos de ConeTec (círculos fucsia). ....                                                                    | 78 |
| Figura 30. Distribución de los valores de $Q_m$ y $F_r$ para los tipos de relaves por $C_p\%$ y ubicación de los valores de la Tabla 7 para los casos históricos y representativos en el diagrama SBTn. ....                                                                                                                                                                                                     | 79 |
| Figura 31. Gráfico de barras apiladas al 100% con la frecuencia porcentual apilada para cada intervalo del $\psi$ y los casos de la Tabla 10 representados como estrellas. El límite de contracción-dilatación ( $\psi = -0.5 \pm 0.02$ ) se muestra como una línea negra discontinua.....                                                                                                                       | 81 |

## LISTA DE TABLAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Estimación del $k$ para los tipo de suelo de acuerdo con el $I_c$ (Robertson, 2010). (*): sobreconsolidado y/o cementado. ....                                                                                                                                                             | 31 |
| Tabla 2. Coeficientes de permeabilidad (m/s) para los diferentes tipos de suelos, el $k$ modificado de Alfaro & Mora (2014).....                                                                                                                                                                    | 32 |
| Tabla 3. Clasificación del tipo de suelo de acuerdo con el $I_c$ (Robertson P. K., 2010), (*): sobreconsolidado y/o cementado. ....                                                                                                                                                                 | 33 |
| Tabla 4. Clasificación del tipo de suelo de acuerdo con el $I_B$ . ....                                                                                                                                                                                                                             | 35 |
| Tabla 5. Selección de gráfico para el tipo de variable estadística. ....                                                                                                                                                                                                                            | 36 |
| Tabla 6. Recopilación de los 24 relaves con su ensayo CPTu del proyecto 00000507 de CONCYTEC. S: relave pulpa, T: relave espesado, P: relave en pasta, F: relave filtrado compactado, ¿?: No se conoce, (*): Valores asumidos (Vick, 1990). ....                                                    | 48 |
| Tabla 7. Media y mediana de los valores de $Q_m$ , $F_r$ , $I_c$ y $Q_{m,cs}$ para los casos históricos de fallas de licuefacción de flujo, ejemplos de arenas de relaves, en Brumadinho, Cadia y de la base de datos de ConeTec. (*): Valores calculados, (**): Datos con valores de mediana. .... | 49 |
| Tabla 8. Principales características de los 12 casos de relaves seleccionados de la Tabla 6 para el primer análisis. Los colores representan a los tipos de relaves por su $C_p\%$ . (*): Compactado. ....                                                                                          | 52 |
| Tabla 9. Elección del umbral 2.85 (Arroyo y Gens, 2021) para la clasificación de los relaves en finos y gruesos en los diagramas SBTn. ....                                                                                                                                                         | 52 |
| El rango de los valores varía desde valores inferiores a -0.20 hasta valores superiores a 0.05 para los relaves pulpa, espesado, pasta y filtrado. Posteriormente se graficaron los resultados en un diagrama de barras 100% apiladas. ....                                                         | 54 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 10. Seis casos históricos de fallas de licuefacción por flujo (A-F), 4 ejemplos de arenas de relaves (G-J), el punto CPTU-16-03N-R1 de Brumadinho (K), el CPT-N04 en Cadia (M) y un ensayo CPTu de la base de datos de ConeTec (L). (*): Parámetro que será calculado. ....               | 55 |
| Tabla 11. Cantidad de datos totales por cada tipo de relaves por $C_p\%$ para relaves “finos” y “gruesos”.....                                                                                                                                                                                  | 58 |
| Tabla 12. Cantidad de datos totales por cada tipo de relaves por $C_p\%$ para relaves “finos” y “gruesos”, y porcentaje de datos perdidos de los valores de $Q_{tn}$ y $F_r$ post procesamiento geoestadístico.....                                                                             | 65 |
| Tabla 13. Comparación de las medidas de tendencia central antes y después de la eliminación de outliers para los valores de $Q_{tn}$ y $F_r$ por cada tipo de relaves por $C_p\%$ para relaves “finos” y “gruesos”.....                                                                         | 68 |
| Tabla 14. Comparación de la desviación estándar antes y después de la eliminación de outliers para los valores de $Q_{tn}$ y $F_r$ por cada tipo de relaves por $C_p\%$ para relaves “finos” y “gruesos”. .....                                                                                 | 69 |
| Tabla 15. Comparación de media, mediana, moda y desviación estándar de los valores de $Q_{tn}$ y $F_r$ por cada tipo de relaves por $C_p\%$ . ....                                                                                                                                              | 69 |
| Tabla 16. Frecuencia de los datos totales clasificados según el límite contractivo – dilatante ( $\psi = -0.05 \pm 0.02$ ) para los tipos de relave según $C_p\%$ . ....                                                                                                                        | 75 |
| Tabla 17. Seis casos históricos de fallas de licuefacción por flujo (A-F), 4 ejemplos de arenas de relaves (G-J), el punto CPTU-16-03N-R1 de Brumadinho (K), el CPT-N04 en Cadia (M) y un ensayo CPTu de la base de datos de ConeTec (L). (*): Valores calculados, (**): Valor de mediana. .... | 77 |

## RESUMEN

La licuefacción es la pérdida de resistencia y rigidez por un aumento de la presión de agua intersticial, generalmente relacionado a consecuencia de eventos sísmicos (licuefacción dinámica); sin embargo, este fenómeno también se ha originado por el aumento de las cargas estáticas (licuefacción estática) propias de la misma estructura, para esta investigación, en los depósitos de relaves; ejemplos como Merriespruit Harmony Mine en Sudáfrica, Feijão Dam en Brasil, entre otros, han ocurrido bajo estas condiciones. La gestión actual para el depósito de los relaves cuenta con 4 tecnologías según la concentración de sólidos ( $C_p\%$ ): pulpa, espesado, pasta y filtrado, cuyo contenido de agua disminuye respectivamente, con la finalidad de asegurar su estabilidad.

En esta investigación los resultados de los datos extraídos de ensayos CPTu del expediente N°00000507 de CONCYTEC, procesados en Excel e IBM SPSS, revelaron mediante gráficos geotécnicos y estadísticos, que los relaves pulpa, espesado y pasta presentaban un comportamiento mecánico muy similar y potenciales a la licuefacción estática con pérdida de resistencia del material de los relaves bajo carga. Estadísticamente, se clasificaron como finos ( $I_c > 2.85$ ), evidenciando valores de  $Q_m$ ,  $F_r$  y  $\psi$  cercanos a los casos históricos de fallamiento por licuefacción estática, en contraste con los relaves filtrados compactados que presentaron mayormente relaves gruesos ( $I_c < 2.85$ ) no saturados y con condiciones drenadas.

Este hallazgo contribuye al estado del arte para entender el comportamiento de las playas de relave según su disposición demostrando que el CPTu es un ensayo muy valioso en la caracterización del suelo y estimación a la licuefacción estática, que al ser complementado con herramientas estadísticas básicas pero eficientes, permiten realizar interpretaciones a escala global en diferentes partes del mundo, permitiendo evaluar el método de disposición adecuado teniendo en cuenta su posible comportamiento y prevenir futuros colapsos dentro de las playas de relaves.

## Capítulo I. Introducción

### 1.1. Introducción

De acuerdo con el Reglamento de la Ley N°31211 cita “las empresas del tipo minero-metalúrgicas deben contar con un adecuado transporte y disposición final de los relaves (...)”, desechos obtenidos luego de la etapa del procesamiento y obtención del mineral económico de interés. Por ello, en la Gestión de los residuos mineros se consideran diversos parámetros geotécnicos y escenarios posibles para evitar problemas en la estructura ya que, según el Art. 400° del Decreto Supremo No024-2016-EM, deben ser dispuestos en estructuras diseñadas para su almacenamiento.

Estas estructuras son denominadas Depósitos de Almacenamiento de Relaves (TSF por sus siglas en inglés) y se dividen generalmente en 3 zonas: dique, elaborado a partir de material de empréstito o de la fracción gruesa del relave separado del fino, la playa de relaves y la laguna de aguas claras que tendrá una relación inversa con la concentración de sólidos ( $C_p\%$ ); es decir, a mayor  $C_p\%$  menor será la cantidad de agua depositada. Si se habla de  $C_p\%$  los relaves son clasificados como relaves pulpa, con un  $C_p\%$  entre 25 – 40%, espesados entre 40 – 65%, pasta entre 65 – 80% y filtrados con  $C_p\%$  mayor a 80% (Cacciuttolo y Marinovic, 2022).

Los depósitos de relaves son de gran interés y preocupación dentro del campo de la ingeniería geotécnica dado los casos históricos de fallamiento, un ejemplo representativo es la Presa Feijão I en Brumadinho ocurrido en el año 2019 (K2fly, 2021), sin embargo, este fenómeno data del año 1960 hasta la actualidad, dado al amplio registro o historial de eventos catastróficos, la implementación de nuevas tecnologías o métodos de monitoreo en los depósitos de relaves se ha incrementado.

Generalmente el fallamiento de una estructura ocurre por una mala construcción de la misma o por el fenómeno de licuefacción, sea dinámica o estática. Para cumplir los objetivos de esta investigación el enfoque va dirigido hacia la licuefacción estática.

Un parámetro para poder estimar el potencial a la licuefacción estática es el parámetro de estado ( $\psi$ ) o con el gráfico SBTn en base al  $Q_m$  y  $F_r$  del 2016 (Robertson P. K., 2016) para determinar el comportamiento contractivo-dilatante, siendo el primero con mayor susceptibilidad a la licuefacción. Ambas formas derivan de procedimientos y cálculos a partir de los valores de la resistencia del cono ( $q_c$ ), la presión de agua intersticial ( $u$ ) y la fricción del cono ( $f_s$ ) de ensayos CPTu.

Piezocone Penetration Test (CPTu por sus siglas en inglés) o Ensayo de Piezocono, es un tipo de ensayo in situ que mediante empuje directo penetra el suelo, generalmente blando, a una velocidad constante de 20 mm/s captando en tiempo real el  $q_c$  con una punta cónica, el  $u$  mediante un filtro ubicado entre la punta y el manguito de fricción; y el  $f_s$  con el manguito de fricción.

Estos parámetros son correlacionables y puede obtenerse la densidad relativa ( $D_r$ ), parámetro de estado ( $\psi$ ), módulo de Young ( $E$ ) y de corte ( $G$ ), OCR, esfuerzo de corte no drenado ( $s_u$ ), el coeficiente de consolidación ( $c_h$ ), ángulo de fricción máximo ( $\phi'$ ), relación de tensión in situ ( $K_0$ ), módulos pequeños de deformación de cizallamiento ( $G_0$ ), compresibilidad 1-D ( $M$ ), sensibilidad ( $S_t$ ) y permeabilidad ( $k$ ) necesarios para el diseño, construcción y cimientos de estructuras, estabilidad del terreno, el comportamiento del suelo y la estratigrafía del suelo, para este último se requiere la resistencia normalizada utilizando un exponente de tasa de tensión variable ( $Q_m$ ), la tasa de fricción normalizada ( $F_r$ ) y el índice de comportamiento del suelo ( $I_c$ ), calculados a partir de los 3 parámetros ya mencionados.

A partir del  $Q_m$  y  $F_r$  se obtiene el diagrama del tipo de comportamiento del suelo normalizado (Robertson & Cabal, 2022) clasificando 9 tipos de suelos; su uso está enfatizado para suelos naturales, por lo tanto, solo será una referencia para la descripción de las propiedades y determinar el tipo de suelo de las playas de relaves.

La finalidad de esta tesis es proporcionar conocimiento al estado del arte sobre el comportamiento de las playas de relaves y su potencial a la licuefacción estática en condiciones no drenadas evaluándolos a diferentes concentraciones de sólidos utilizando el ensayo CPTu y herramientas estadísticas para así estimar preliminarmente cuál de los 4 tipos de relaves representa las mejores condiciones para evitar el fallamiento por licuefacción estática en condiciones no drenadas tomando los valores de  $Q_m$ ,  $F_r$  y  $\psi$  evaluados geotécnica y estadísticamente.

## **1.2. Planteamiento del problema**

La selección del método de disposición final de los relaves es importante para reducir la cantidad de agua depositada y así mejorar la estabilidad y minimizar la filtración (Gidahatari Agua, 2012), y dado que la licuefacción es la segunda causa más común del fallamiento o colapso de una estructura, una metodología optada es el uso de relaves en pasta (Freeport - McMoran Sierrita INC., 2008) gracias a sus propiedades de baja permeabilidad y homogeneidad; sin embargo, los relaves se encuentran sujetos a condiciones meteorológicas, químicas y físicas, relativamente rápidas, con el consiguiente cambio en sus propiedades geotécnicas (Jaime y Sanabria, 2018) a través del tiempo. Por lo que los relaves pulpa, espesado, pasta y filtrado de diferentes partes del mundo podrían tener modificaciones post-almacenamiento, cuya verificación del comportamiento del suelo sería evaluado a partir del ensayo CPTu y la estadística, tanto como sus parámetros geotécnicos de resistencia y fricción, si es contractivo/dilatante, su parámetro de estado y consiguientemente si serían susceptibles a la licuefacción estática en condiciones no drenadas, y así se obtendría de forma preliminar el

tipo de disposición más adecuado teniendo en cuenta su posible comportamiento, tipo de suelo, si presentaría más relaves finos o gruesos, y potencial a la licuefacción.

### **1.3. Formulación del problema**

#### **1.3.1. General**

¿Es posible evaluar y caracterizar el comportamiento en la playa de relaves y el potencial a la licuefacción a diferentes concentraciones de sólidos a partir de la información obtenida del CPTu complementado con herramientas estadísticas?

#### **1.3.2. Específicos**

¿Los relaves pulpa, espesado, pasta y filtrado presentarán un comportamiento mecánico similar en la playa de relaves según los valores de  $Q_m$ ,  $F_r$  y el límite entre relaves finos y gruesos de 2.85?

¿Es posible evaluar el tipo y comportamiento de suelo de los relaves con los gráficos SBTn y herramientas estadísticas a partir del cálculo de los valores de  $Q_m$ ,  $F_r$  y  $\psi$ ?

¿Cuáles la medida de tendencia central que representa de manera óptima la evaluación geotécnica de los valores de  $Q_m$ ,  $F_r$  a diferentes concentraciones de sólidos y el límite entre relaves finos y gruesos de 2.85?

¿Existe una similitud en los valores de  $Q_m$ ,  $F_r$  y  $\psi$  entre los casos de relaves a diferentes concentraciones de sólidos y los casos históricos/representativos de fallamiento por licuefacción estática en condiciones no drenadas?

¿Cuál(es) de los relaves a diferentes concentraciones de sólidos podría(n) presentar las mejores condiciones para prevenir un futuro colapso por licuefacción estática en condiciones no drenadas en base a la evaluación geotécnica y estadística de los valores de  $Q_m$ ,  $F_r$  y  $\psi$ ?

## **1.4. Objetivos de la investigación**

### ***1.4.1. Objetivo general***

Evaluar la influencia de la concentración de sólidos y la susceptibilidad a la licuefacción estática de las playas en diferentes depósitos de relaves mediante la aplicación del CPTu y herramientas estadísticas.

### ***1.4.2. Objetivos específicos***

Evaluar el tipo de suelo y comportamiento contractivo-dilatante según los gráficos SBTn de P.K. Robertson del 2010 y 2016, en las playas de relaves a diferentes concentraciones de sólidos con un umbral  $I_c=2.85$ .

Calcular los valores de  $Q_{tn}$ ,  $F_r$  y  $\psi$  a diferentes concentraciones de sólidos y evaluar el tipo y comportamiento del suelo de los relaves con los gráficos SBTn y herramientas estadísticas.

Evaluar qué medida de tendencia central representa los valores de  $Q_{tn}$ ,  $F_r$  y  $\psi$  obtenidas de la población de datos de los ensayos CPTu a diferentes concentraciones de sólidos y con un umbral  $I_c=2.85$ .

Comparar los resultados con los casos de fallamiento por licuefacción estática en condiciones no drenadas recopilados por P.K. Robertson en el 2010 y muestras de relaves recopilados por P.K. Robertson en el 2016.

Estimar cuál de los 4 tipos de relaves representa las mejores condiciones para prevenir el fallamiento por licuefacción estática en condiciones no drenadas tomando en cuanto los valores de  $Q_{tn}$ ,  $F_r$  y  $\psi$  evaluados geotécnica y estadísticamente.

## Capítulo II. Generalidades

### 2.1. Base de datos

Debido a que el CPTu es realizado por empresas consultoras especializadas en este campo, el acceso a la información es restringida y confidencial, por ello la presente tesis mostrará únicamente los resultados y análisis en base a lo encontrado en el proyecto 00000507 de CONCYTEC y en la recopilación bibliográfica referente a investigaciones relacionadas a las playas de relaves.

### 2.2. Estado del arte.

#### 2.2.1. *Wels et al. (2000).*

Clasifica por primera vez al embalse de relaves de uranio Culmitzsch, Alemania en 3 zonas: Beach, intermediate y slimes zone, que a su vez están subclasificados según las características de los relaves en el perfil de relaves más profundo y realiza una tabla comparativa de valores geotécnicos necesarios para entender el comportamiento en cada zona con un resumen estadístico descriptivo (media, máximo y mínimo).

#### 2.2.2. *Robertson (2010).*

Plotea y zonifica con rangos calculados mediante la estadística (media y desviación estándar) para los casos históricos de fallamiento por licuefacción de flujo con resistencia de penetración medida o estimada en el diagrama de clasificación de suelos normalizados en base al  $Q_m - F_r$ , únicamente para aquellos que pertenecen a la clase A, ya que contienen los datos más confiables de los valores de  $q_t$ ,  $f_s$  y  $u_2$ .

#### 2.2.3. *Robertson (2016).*

Propone una nueva metodología para poder clasificar los suelos en base a su comportamiento y no a características físicas (textura, granulometría y plasticidad). Enfatiza la importancia del

contexto geológico del suelo, selecciona ejemplos representativos que son descritos en base a su litología, edad geológica y los valores normalizados, cada uno con su referencia correspondiente.

#### **2.2.4. *Mayne, P. et al. (2017).***

Indica que los materiales contractivos normalmente consolidados a ligeramente sobreconsolidados son propensos a la licuefacción de flujo. Expone diferentes casos de depósitos de relaves donde se compran parámetros como el yield stress y los obtenidos del CPT.

#### **2.2.5. *Burdano (2021).***

Resume las características geotécnicas en diferentes casos de relaves de acuerdo con el metal extraído (hierro, cobre, oro, plomo-zinc), menciona las diferencias y definiciones de las diferentes deposiciones de relaves con la finalidad de crear nuevas tecnologías que permitan mejorar los suelos para la remediación de presas.

#### **2.2.6. *Morales et al. (2021).***

Realiza la comparación en las zonas de dique y embalse en un antiguo relave de cobre, utiliza los valores de  $q_t$ ,  $f_s$  y  $u_2$ , el parámetro de estado ( $\psi$ ) y el índice de comportamiento del suelo ( $I_c$ ), siendo este último calculado en base las ecuaciones de Robertson & Wride (1998) y Been & Jefferies (1992), concluyendo que en la zona del embalse se presentan suelos del tipo contractivo por valores del parámetro de estado más altos.

## **2.3. Marco Teórico Metalúrgico-Geotécnico**

### **2.3.1. Relaves.**

Por relaves entendemos que son los desechos finales en suspensión compuestos de partículas finas producto del proceso metalúrgico para la obtención del mineral económico. De acuerdo con el Reglamento Peruano, la Ley N° 31211 (2021), indica que las empresas del tipo minero-metalúrgicas, deben contar con un adecuado transporte y disposición final de sus relaves que, según el Art. 400° del Decreto Supremo N°024-2016-EM, deben ser dispuestos en estructuras diseñadas específicamente para tal fin, lo que comúnmente conocemos como depósitos de relaves.

### **2.3.2. Depósitos de relaves.**

En el Perú, según la Ley 31211, es toda obra estructurada en forma segura para contener los relaves generados como subproducto del proceso minero-metalúrgico, es necesario realizar un seguimiento y estudios técnicos para asegurar la estabilidad físico-química y evitar un posible fallamiento o colapso.

En general, los depósitos de relaves presentan un dique, una zona de playa de relaves y una laguna de aguas claras, la cual irá desapareciendo conforme se incremente la concentración de sólidos.

### **2.3.3. Tipos de relaves.**

Los relaves pueden clasificarse de diferentes maneras, de acuerdo con su concentración de sólidos, diseño de contención, método de construcción, naturaleza del mineral económico, entre otros. En este caso esta tesis se enfoca en la clasificación por contenido de sólidos, o sea, a la cantidad de sólidos presente en la pulpa, usualmente está expresada en porcentaje, su cálculo se encuentra en la ecuación o se puede deducir si se conoce la gravedad específica del sólido en la pulpa.

$$Cp\% = 100 \times \frac{W_{sólido}}{W_{pulpa}}$$

Cacciuttolo y Marinovic (2022) permite clasificarlos en:

#### **2.3.3.1. Relaves pulpa.**

Suspensión de relaves con una concentración de sólidos entre 25 – 40% por peso. Se requieren espesadores convencionales.

#### **2.3.3.2. Relaves espesados.**

Relaves con una concentración de sólidos entre un 40 – 65%, haciendo que la segregación sea nula y convirtiéndolo en un depósito homogéneo, mediante el uso de espesadores de alta compresión con el fin retirar parte del agua, sin embargo, este relave puede poseer un contenido de agua remanente que puede ser recuperado.

#### **2.3.3.3. Relaves en pasta.**

Tipo de relave ubicado entre los relaves espesados y filtrados, posee una concentración de sólidos entre 65 – 80%, teniendo una mayor cantidad de finos y bajo contenido de agua. Se utilizan espesadores de cama profunda.

#### **2.3.3.4. Relaves filtrados.**

Relaves sometidos a procesos de filtración para obtener una concentración de sólidos mínimo del 80%. Se requiere de filtros y en manejo de deposición de relaves secos como correas transportadoras/camiones.

#### **2.3.4. Colapso o fallamiento**

Las fallas en presas de relaves tienen diferentes causas: problemas de infraestructura, licuefacción tanto estática como dinámica, entre otras. El principal problema que favorece el proceso de falla es la existencia de un alto grado de saturación en los residuos mineros

almacenados en las presas, como se había mencionado las consecuencias involucran pérdida de vidas humanas, pérdidas económicas, degradación y contaminación del medio ambiente (Oldecop y Rodríguez, 2007).

La licuefacción viene ser la pérdida de la resistencia y rigidez del suelo, usualmente en suelos saturados, dándole un comportamiento líquido, generalmente se da en suelos sueltos como las arenas, sin embargo, este fenómeno puede ser tanto estático como dinámico; es decir, producto de la carga por la propia estructura y producidos por sismos, respectivamente. Una forma de estimar el potencial a licuefacción de un suelo es mediante el parámetro de estado ( $\psi$ ) cuando el suelo tiene un comportamiento contractivo.

Los suelos contractivos son aquellos que pierden volumen con un cambio significativo en la variación de su contenido de humedad produciendo un problema de estabilidad en la estructura, usualmente son suelos con un alto contenido de arcillas, a diferencia de suelos dilatantes, donde ocurre un aumento de volumen por un cambio en el contenido de humedad, tiene bajo contenido de minerales arcillosos y una mayor proporción de arenas y grava generalmente, lo cual lo hace óptimo para ayudar a aumentar la estabilidad del suelo.

#### **2.3.5. Gravedad específica.**

Es la relación del peso unitario del sólido, en este caso el relave, en relación con el peso unitario del agua, es un valor adimensional y está dada por:

$$G = \frac{\gamma_{\text{sólido}}}{\gamma_{\text{agua}}}$$

#### **2.3.6. Cone Penetration Test o Ensayo de Piezocono (CPTu).**

El CPTu es un tipo de ensayo in situ que requiere de un piezocono electrónico para penetrar el suelo mediante empuje y con método eléctricos mide 3 parámetros geotécnicos importantes

que permiten conocer y clasificar la estratigrafía del sitio sin necesidad de realizar muestreos (Díaz, 2011) y a tiempo real.

Los parámetros geotécnicos indicados en la Norma ASTM D5778-20 (2020) son la resistencia total por punta corregida ( $q_t$ ), resistencia de fricción que haya en el fuste ( $f_s$ ) y la presión intersticial ( $u_2$ ), la lectura de estos valores se realiza a una velocidad constante de 20 mm/s, a tiempo real, cada 50 mm como mínimo, para mejores versiones se utilizan intervalos de 20 a 10 mm, además de proporcionar datos que son aplicados en la ingeniería de los suelos.

El piezocono está compuesto principalmente por una punta cónica, un fuste de fricción y un sensor para la detección de la presión intersticial, esta última presenta 3 tipos de acuerdo con la posición de este en el piezocono (Figura 1). La medida estándar según la Norma ASTM D5778-20 (2020) es de 10 – 15 cm<sup>2</sup> (Figura 2).

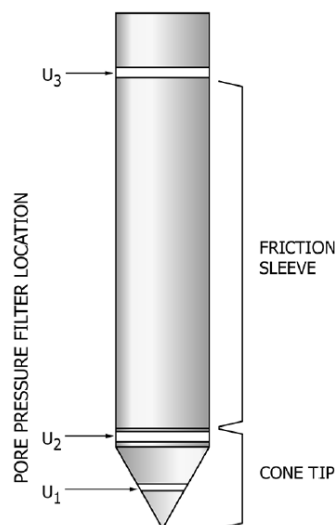


Figura 1. Estructura del piezocono y las 3 ubicaciones para la presión intersticial (ASTM D5778-20, 2020).

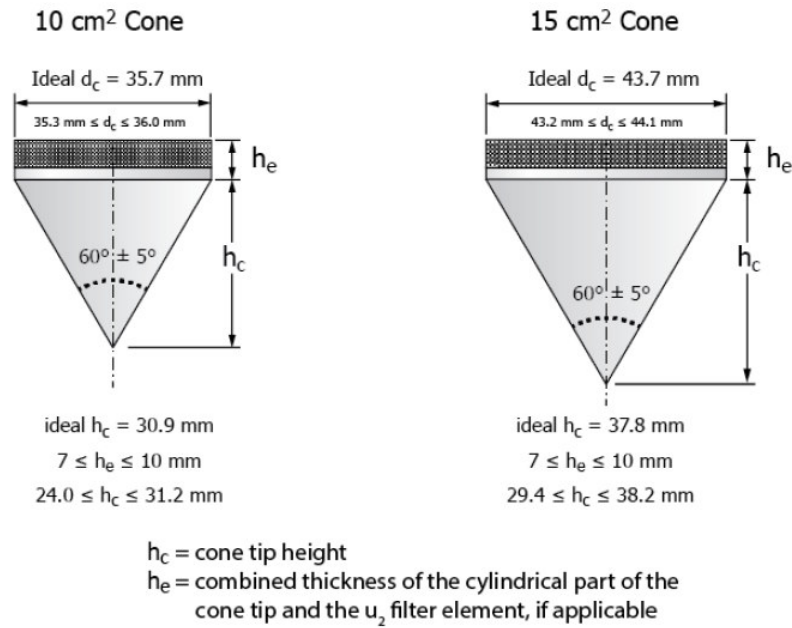


Figura 2. Dimensiones para punta de piezocono de 10 cm<sup>2</sup> y 15 cm<sup>2</sup>. (ASTM D5778-20, 2020).

### 2.3.6.1. Parámetros geotécnicos.

A continuación, los parámetros obtenidos en tiempo real a partir del piezocono:

#### a. Resistencia total de punta corregida ( $q_t$ ). (ASTM D5778-20, 2020)

Resistencia de la punta corregida por la presión del agua que actúa detrás de la punta.

La corrección de la presión del agua requiere medir la presión del agua con un elemento piezocono colocado detrás de la punta en la ubicación  $u_2$ . La corrección da como resultado la resistencia total estimada de la punta,  $q_t$ .

$$q_t = q_c + (1 - \alpha) \cdot u_2$$

Donde:

$q_c$ : resistencia por punta

$q_t$ : resistencia por punta corregida, en KPa (Sistema internacional, S.I.)

$u_2$ : presión de poro dinámica registrada detrás de la punta ( $u_2$  posición)

$\alpha$ : área de relación de área neta para el cono (normalmente 0.80)

***b. Resistencia de fricción del fuste ( $f_s$ ). (ASTM D5778-20, 2020)***

El componente de fricción de la resistencia a la penetración desarrollado en un manguito de fricción, igual a la fuerza cortante aplicada al manguito de fricción dividida por su área de superficie.

$$f_s = \frac{Q_s}{A_s}$$

Donde:

$Q_s$ : fuerza de fricción en el fuste.

$A_s$ : área del fuste de fricción, m<sup>2</sup>

***c. Tasa de fricción ( $R_f$ ). (ASTM D5778-20, 2020)***

Relación entre  $f_s$  y  $q_t$ .

$$R_f = \frac{f_s}{q_t} \times 100$$

Donde:

$R_f$ : tasa de fricción, %

$f_s$ : resistencia de fricción del fuste, KPa

$q_t$ : resistencia por punta corregida, KPa

100: conversión de decimal a porcentaje

***d. Presión intersticial ( $u_2$ ). (ASTM D5778-20, 2020)***

Presión de líquido medido por el penetrómetro piezocono, se ubica en la posición del hombro detrás de la punta del cono.

Si bien estos valores nos brindan datos en tiempo real es necesario que sean normalizados debido a la influencia de la profundidad por los esfuerzos efectivos de sobrecarga que son cada vez mayores.

A continuación se presentan las ecuaciones de normalización y otros cálculos, respetando la Norma ASTM D5778-20 (2020) y la 7<sup>ma</sup> Guía de CPT para Ingeniería geotécnica (Robertson & Cabal, 2022)

***e. Índice de comportamiento de suelo ( $I_c$ )***

Se halla utilizando los valores de  $Q_{tn}$  y  $F_r$ , según (Robertson & Cabal, 2022)

$$I_c = [(3.47 - \log Q_{tn})^2 + (\log F_r + 1.22)^2]^{0.5}$$

Donde:

$Q_{tn}$ : resistencia por punta normalizada utilizando un exponente de tensión variable, adimensional.

$F_r$ : tasa de fricción normalizada, %

***f. Índice de tipo de comportamiento del suelo modificado ( $I_B$ ). (Robertson & Cabal, 2022)***

$$I_B = 100 \cdot (Q_{tn} + 10) / (70 + Q_{tn} F_r)$$

***g. Límite contractivo-dilatante (CD). (Robertson & Cabal, 2022)***

$$CD = (Q_{tn} - 11) \cdot (1 + 0.06 F_r)^{17}$$

***h. Resistencia por punta normalizada utilizando un exponente de tensión variable ( $Q_{tn}$ ). (Robertson & Cabal, 2022)***

$$Q_{tn} = \left( \frac{q_t - \sigma_{vo}}{P_a} \right) \cdot \left( \frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^n$$

Donde:

$P_a$ : presión atmosférica

$n$ : tasa de tensión variable, varía entre 0.5, 0.70 y 1.0 y se selecciona de manera iterativa basada sobre el  $I_c$  resultante.

$\sigma_{vo}$ : Esfuerzo vertical total

$\sigma'_{vo}$ : Esfuerzo efectivo

***i. Tasa de fricción normalizada ( $F_r$ ). (ASTM D5778-20, 2020)***

$$F_r = \frac{f_s}{(q_t - \sigma_{vo})} \times 100$$

Donde:

$\sigma_{vo}$ : esfuerzo vertical total

Presión intersticial en equilibrio ( $u_o$ ). (ASTM D5778-20, 2020)

Se calcula como:

$$u_o = h_w \cdot \gamma_w$$

o

$$u_o = (z - z_w) \cdot \gamma_w$$

Donde:

$h_w$ : altura del agua, en m

$\gamma_w$ : peso unitario del agua, KN/m<sup>3</sup>

$z$ : profundidad de interés, en m

$z_w$ : profundidad del nivel freático (m)

***j. Peso unitario del suelo ( $\gamma$ ).***

Se determina con la siguiente relación, según Robertson & Cabal (2022):

$$\gamma/\gamma_w = \left[ 0.27 \cdot [\log R_f] + 0.36 \cdot \left[ \log \left( \frac{q_t}{P_a} \right) \right] + 1.236 \right] \cdot \frac{G_s}{2.65}$$

Donde:

$R_f$ : tasa de fricción, %

$\gamma_w$ : peso unitario del agua, debe estar en la misma unidad que el  $\gamma$

$P_a$ : presión atmosférica

$G_s$ : gravedad específica del suelo

***k. Parámetro de estado ( $\psi$ )***

Este valor es utilizado como una visualización preliminar del potencial de licuación del suelo (Robertson P. K., 2010). Robertson & Cabal (2022) sugieren:

$$\psi = 0.56 - 0.33 \cdot \log Q_{tn,cs}$$

Donde:

$Q_{tn,cs}$ : La resistencia normalizada equivalente del cono de arena limpia.

***l. Resistencia normalizada equivalente del cono de arena limpia ( $Q_{tn,cs}$ )***

Según Robertson & Cabal (2022),

$$Q_{tn,cs} = Q_{tn} \cdot K_c$$

Donde:

$K_c$ : factor de corrección que considera el cambio de comportamiento con el aumento del contenido de finos y la compresibilidad. Este se calcula como (Robertson & Cabal, 2022):

$$K_c \approx 15 - \frac{14}{1 + (I_c/2.95)^{11}} \leftrightarrow I_c \leq 3.0$$

Y cuando el  $I_c < 1.7 \rightarrow K_c = 1.0$

***m. Conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad (k)***

Este valor puede estimarse con el CPTu mediante la siguiente ecuación (Robertson & Cabal, 2015):

$$\text{Cuando } 1.0 < I_c \leq 3.27 \rightarrow k = 10^{(0.952 - 3.04 \cdot I_c)} \text{ m/s}$$

$$\text{Cuando } 3.27 < I_c < 4.0 \rightarrow k = 10^{(-4.52 - 1.37 \cdot I_c)} \text{ m/s}$$

Posteriormente Robertson & Cabal (2015) estimó la permeabilidad según el tipo de comportamiento de suelo (Tabla 1) que se desarrolla más en el ítem 2.3.6.2.

| Zona | Tipo de comportamiento de suelo | Rango de $k$ (m/s)                   | $I_c$         |
|------|---------------------------------|--------------------------------------|---------------|
| 1    | Sensitivo, grano fino           | $3 \cdot 10^{-10} - 3 \cdot 10^{-8}$ | N/A           |
| 2    | Suelos orgánicos, arcillas      | $1 \cdot 10^{-10} - 1 \cdot 10^{-8}$ | $> 3.60$      |
| 3    | Arcillas                        | $1 \cdot 10^{-10} - 1 \cdot 10^{-9}$ | $2.95 - 3.60$ |
| 4    | Mezcla de limos                 | $3 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-7}$  | $2.60 - 2.95$ |
| 5    | Mezcla de arenas                | $1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-5}$  | $2.05 - 2.60$ |
| 6    | Arenas                          | $1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-3}$  | $1.31 - 2.05$ |
| 7    | Arena gravosa a arena densa     | $1 \cdot 10^{-3} - 1$                | $< 1.31$      |
| 8    | Suelo muy rígido/denso*         | $1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-3}$  | N/A           |
| 9    | Suelo muy rígido – grano fino*  | $1 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-7}$  | N/A           |

Tabla 1. Estimación del  $k$  para los tipo de suelo de acuerdo con el  $I_c$  (Robertson, 2010).

(\*): sobreconsolidado y/o cementado.

Sin embargo en el campo de la ingeniería civil (Tabla 2), este coeficiente se clasifica según Alfaro & Mora (2014):

| <b>Tipos de suelo</b> | <b>Grado relativo de permeabilidad</b> | <b><math>k</math> (m/s)</b>         | <b>Drenaje</b>        |
|-----------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| Grava limpia          | Alto                                   | $1 \cdot 10^{-3}$                   | Buena                 |
| Arena limpia          | Medio                                  | $1 \cdot 10^{-5}$                   | Buena                 |
| Grava arenosa         | Medio                                  | $1 \cdot 10^{-5}$                   | Buena                 |
| Arena fina            | Bajo                                   | $1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-7}$ | Franca a pobre        |
| Limos                 | Bajo                                   | $1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-7}$ | Franca a pobre        |
| Arena limo arcilloso  | Muy bajo                               | $1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-9}$ | Pobre o imperceptible |
| Arcilla homogénea     | Muy bajo a impermeable                 | $< 1 \cdot 10^{-9}$                 | Pobre o imperceptible |

Tabla 2. Coeficientes de permeabilidad (m/s) para los diferentes tipos de suelos, el  $k$  modificado de Alfaro & Mora (2014).

### 2.3.6.2. Diagramas de Clasificación del Tipo de Suelo.

Para la clasificación el suelo a partir de la data del CPTu, se utiliza el diagrama Soil Behavior Type o SBT y sus variantes normalizadas, realizadas por Robertson, P.K. (2016), donde se requieren los valores de  $Q_m$  y  $F_r$ .

#### *a. Diagrama SBTn en base al $Q_m$ y $F_r$ (Robertson P. K., 2010)*

Este diagrama utiliza el  $I_c$  para diferenciar el tipo de comportamiento del suelo (Tabla 3) en base al  $Q_m$  y  $F_r$  en escala logarítmica, donde el  $Q_m$  va desde 1 hasta 1000, y el  $F_r$  desde 0.1 a 10 con una zonificación de los suelos normalmente consolidados (Figura 3), además las propiedades como la sensibilidad, densidad, OCR, cementación y edad del suelo se encuentran direccionadas indicando el incremento de tales propiedades. Este gráfico es básico y ha estado sujeto a modificaciones, ya sea por el mismo autor u otros.

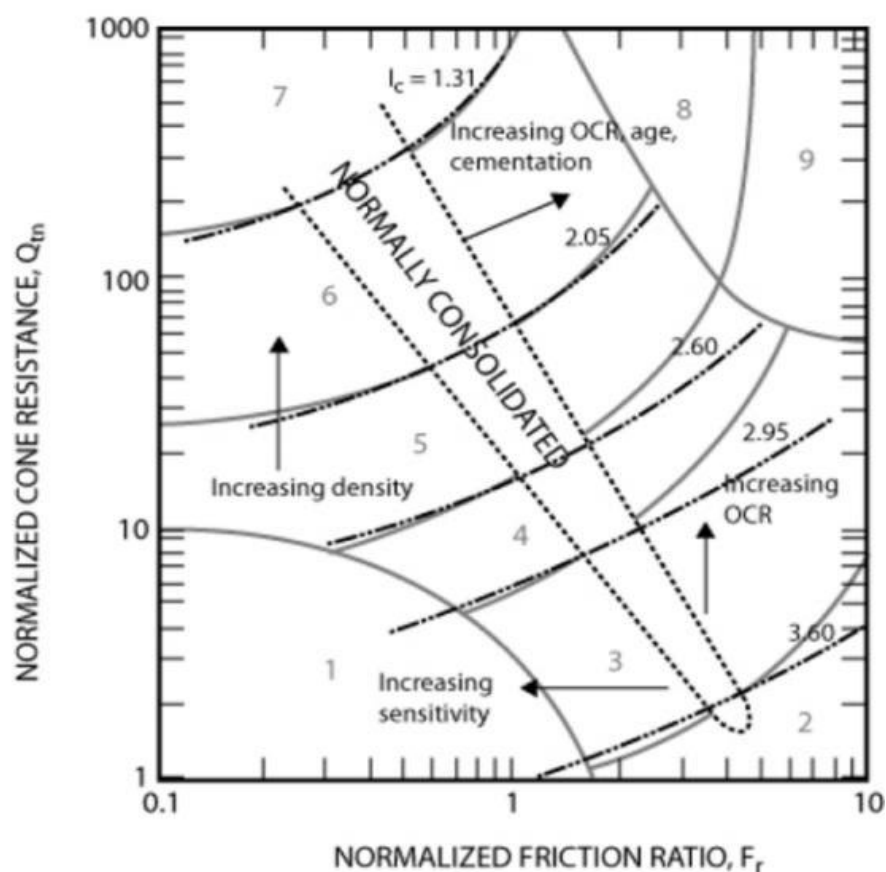


Figura 3. Diagrama SBTn en base al  $Q_m$  y  $F_r$  (Robertson P. K., 2010).

| Zona | Tipo de comportamiento de suelo                   | $I_c$       |
|------|---------------------------------------------------|-------------|
| 1    | Sensitivo, grano fino                             | N/A         |
| 2    | Suelos orgánicos, arcillas                        | > 3.60      |
| 3    | Arcillas – arcillas limosas a arcillas            | 2.95 – 3.60 |
| 4    | Mezcla de limos – limo arcilloso a arcilla limosa | 2.60 – 2.95 |
| 5    | Mezcla de arenas – arena limosa a limo arenoso    | 2.05 – 2.60 |
| 6    | Arenas – arena limpia a arena densa               | 1.31 – 2.05 |
| 7    | Arena gravosa a arena densa                       | < 1.31      |
| 8    | Arena muy rígida a arena limosa*                  | N/A         |
| 9    | Muy rígido, grano fino*                           | N/A         |

Tabla 3. Clasificación del tipo de suelo de acuerdo con el  $I_c$  (Robertson P. K., 2010),

(\*): sobreconsolidado y/o cementado.

**b. Diagrama SBTn en base al  $Q_m$  y  $F_r$  (Robertson & Cabal, 2015)**

A diferencia del diagrama del 2010, Robertson & Cabal (2015) agregaron el comportamiento contractivo-dilatante definiendo 4 tipo de suelos: CD, FD, CC y FC (Figura 4), además divide la capacidad de drenaje del suelo como drenado, no drenado y una zona transicional en base a un  $I_c = 2.6$ . Este diagrama al igual que la versión del 2010, está en función al  $Q_m$  y  $F_r$  en escala logarítmica, donde el  $Q_m$  va desde 1 hasta 1000, y el  $F_r$  desde 0.1 a 10, sin embargo, para evitar una densificación de información se omitió la zonificación de los suelos normalmente consolidados y las propiedades como la sensibilidad, densidad, OCR, cementación y edad del suelo.

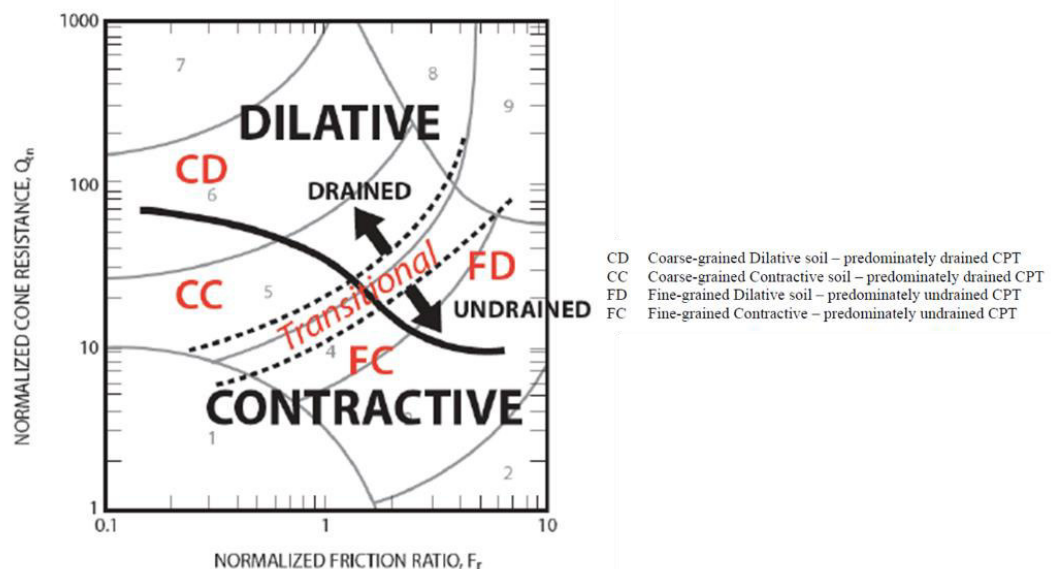


Figura 4. Diagrama SBTn del CPT normalizado, en base al  $Q_m$  y  $F_r$  (Robertson & Cabal, 2015).

**c. Diagrama SBTn en base al  $Q_m$  y  $F_r$  (Robertson P. K., 2016)**

Este diagrama, similar al del 2015, utiliza el  $I_B$  para diferenciar el tipo de comportamiento del suelo (Tabla 4) superpuesto sobre el gráfico del 2010, este

diagrama clasifica los suelos en 7: CCS, CC, SC, TC, CD, TD y SD, además de definir el límite del comportamiento contractivo-dilatante (CD) con un valor de 70 (Figura 5).

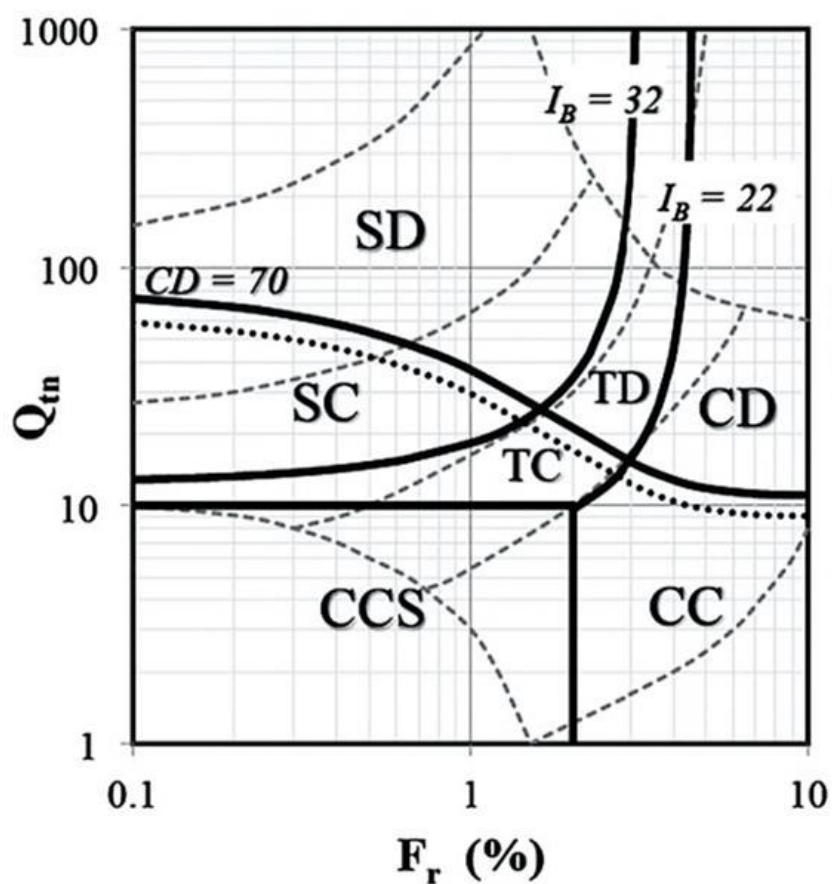


Figura 5. Diagrama SBTn modificado y publicado por Robertson (2016).

| Zona | Tipo de comportamiento de suelo   |
|------|-----------------------------------|
| CCS  | Contractivo – sensitivo arcilloso |
| CC   | Contractivo arcilloso             |
| CD   | Dilatante arcilloso               |
| TC   | Transicional contractivo          |
| TD   | Transicional dilatante            |
| SC   | Contractivo arenoso               |
| SD   | Contractivo – sensitivo arenoso   |

Tabla 4. Clasificación del tipo de suelo de acuerdo con el  $I_B$ .

## 2.4. Marco Teórico Estadístico.

### 2.4.1. ¿Qué es la estadística?

Conforma una de las ramas de la matemática. Es una ciencia metodológica (Alperin, 2013) que en función del campo de estudio, tales como hidrogeología, hidrología, petrología ígnea y sedimentaria, pedología, evaluación de recursos naturales (gas, petróleo y minerales), evaluación de impacto ambiental, gestión ambiental, teledetección, entre otras, se realiza la recolección o recopilación, organización, procesamiento, análisis e interpretación de una muestra tomada de una población de datos para llegar a conclusiones mediante la presentación en tablas y gráficos estadísticos (Tabla 5) reduciéndolos a un pequeño número de medidas estadísticas que permitirán su comparación (Experto GestioPolis.com, 2020).

| Variable     |           | Gráfico                                                                                                     |
|--------------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cualitativa  | Nominales | Gráficos circulares<br>Gráficos de barras                                                                   |
|              | Ordinales | Gráficos de barras                                                                                          |
| Cuantitativa | Discretas | Gráficos de barras                                                                                          |
|              | Continuas | Histogramas<br>Polígonos de frecuencias<br>Ojiva<br>Diagramas bivariados<br>Box plot<br>Diagramas ternarios |

Tabla 5. Selección de gráfico para el tipo de variable estadística.

La estadística se puede dividir en estadística descriptiva, teoría de probabilidades e inferencia estadística (Alfaro M. A., 2000). La estadística descriptiva se ocupa del ordenamiento, la presentación, el cálculo de promedios y porcentajes y la síntesis de los datos (Alperin, 2013). La Teoría de Probabilidades. Se ocupa del estudio de fenómenos que ocurren al azar, formulando un conjunto de teoremas o proposiciones que permitan describirlos (Alperin, 2013), y la Inferencia estadística se ocupa de las relaciones entre el modelo matemático y la

práctica para formular conclusiones o predicciones, constituyendo, en cierta forma, la rama aplicada de la estadística (Alfaro M. A., 2000).

#### **2.4.2. Medidas de tendencia central.**

Las medidas de tendencia central más importantes son la media, la mediana y la moda, su objetivo es resumir en un solo valor a un conjunto de valores, y de esta manera representar un centro en la cual se deben encontrar ubicados en conjunto los datos (Euroinnova International Online Education, s.f.)

##### **2.4.2.1. Media ( $\bar{X}$ )**

Es la medida de tendencia central y se define como la suma de todas las observaciones dividida por el número de observaciones (Davis, 2002). Según Alfaro (2000) se determina como:

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$$

Donde:

$n$ : Número datos en total.

$x$ : Datos individuales.

##### **2.4.2.2. Mediana ( $\tilde{X}$ ).**

Es el valor a mitad de camino en la distribución de frecuencias (Davis, 2002). Según Alfaro (2000) se determina como:

Si  $n$  es impar:

$$\tilde{X} = y_{\frac{n+1}{2}}$$

Si  $n$  es par:

$$\tilde{X} = \left[ \frac{y_{\frac{n}{2}} + y_{\frac{n+2}{2}}}{2} \right]$$

Donde:

$n$ : Número datos en total.

$y$ : Datos ordenados de menor a mayor.

#### 2.4.2.3. Moda ( $\hat{X}$ ).

Es el valor que ocurre con mayor frecuencia (Davis, 2002). Según Alperin (2013) se determina como:

$$\tilde{X} = L_{imo} + \left( \frac{\Delta 1}{\Delta 1 + \Delta 2} \right) \cdot C$$

Donde:

$L_{imo}$ : Límite inferior de la clase modal.

$\Delta 1$ : Valor absoluto de la diferencia entre la frecuencia de la clase premodal y modal.

$\Delta 2$ : Valor absoluto de la diferencia entre la frecuencia de la clase posmodal y modal.

$C$ : Amplitud del intervalo de clase.

Hay que tener en cuenta que la presencia de datos atípicos u outliers van a influir en los valores de las medidas de tendencia central resultando en una curva asimétrica que se podrá observar en los histogramas posterior a la prueba de normalidad , siendo la media la más afectada a comparación de la mediana, ya que no depende de la magnitud sino del orden de los datos. La moda no varía pero puede no estar presente como presentar de 2 a más de ellas.

En caso ocurriese la coincidencia de la media, mediana y moda la curva será simétrica (Figura 6a), si hay una gran cantidad de datos con valores pequeños la curva tendrá un tendencia de

cola izquierda (Figura 6b) y si hay una mayor cantidad de datos con valores grandes, la curva tendrá una cola hacia la derecha (Figura 6c).

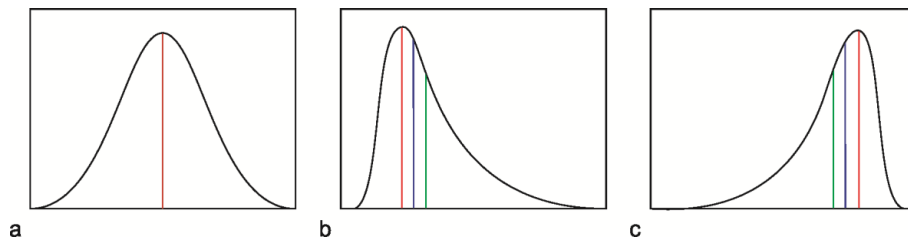


Figura 6. Distribución simétrica ( $\hat{X} = \tilde{X} = \bar{X}$ ). b. Distribución de cola derecha ( $\hat{X} > \tilde{X} > \bar{X}$ ). c. Distribución de cola izquierda ( $\bar{X} > \tilde{X} > \hat{X}$ ). En verde  $\bar{X}$ , en azul  $\tilde{X}$  y en rojo  $\hat{X}$  (Alperin, 2013).

### 2.4.3. Prueba de normalidad.

Nos referimos a normalidad cuando los datos presentan una distribución normal, es decir, la curva resultante debe presentar una forma acampanada.

El hecho de que los datos no presenten una distribución normal es debido a la presencia de valores anómalos o outliers, que pueden producirse por algún error en la medición y/o por causas extrañas y pueden ser eliminados dependiendo del criterio del analista.

Estos outliers se identifican mediante la exploración de los datos en el programa IBM SPSS con gráficos, tales como histogramas, box plot y gráfica Q-Qplot.

La prueba de normalidad puede obtenerse de forma inmediata y accesible con el programa IBM SPSS, el cual considera 2 procedimientos:

#### 2.4.3.1. La prueba de Kolmogorov-Smirnov con corrección de Liliefors

Mediante prueba de hipótesis rechazamos o aceptamos la distribución normal en base a un nivel de significancia del 5%. Esta prueba se trabaja con una cantidad de datos superior a 50.

### 2.4.3.2. La prueba de Shapiro-Wilk

Se aplica el mismo concepto de la prueba de Kolmogorov-Smirnov solo que esta prueba se recomienda aplicar con una cantidad de datos hasta 50.

| Pruebas de normalidad |                                 |      |      |              |      |      |
|-----------------------|---------------------------------|------|------|--------------|------|------|
|                       | Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup> |      |      | Shapiro-Wilk |      |      |
|                       | Estadístico                     | gl   | Sig. | Estadístico  | gl   | Sig. |
| V1                    | .266                            | 1688 | .000 | .514         | 1688 | .000 |

a. Corrección de la significación de Lilliefors

Figura 7. Ejemplo de las pruebas de normalidad para los datos de la variable V1. Se rechaza la distribución normal por el nivel de significancia con corrección de Liliefors inferior a 5%. Elaboración propia.

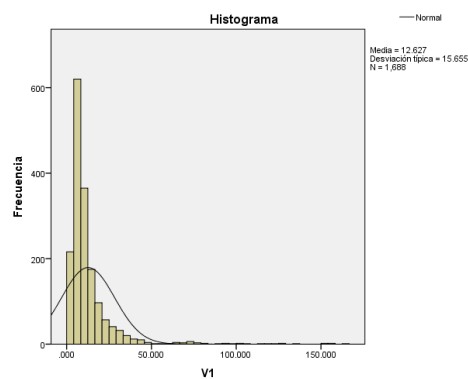


Figura 8. Ejemplo de histograma con distribución no normal. Elaboración propia.

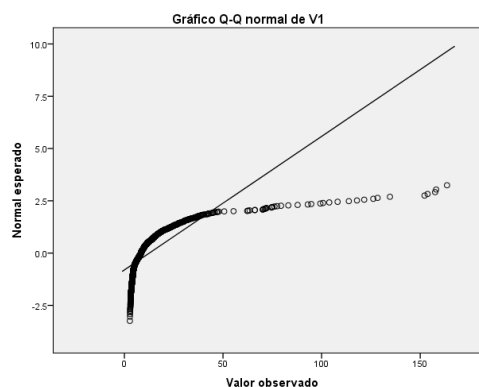


Figura 9. Ejemplo de diagrama Q-Qplot con distribución no normal. Elaboración propia.

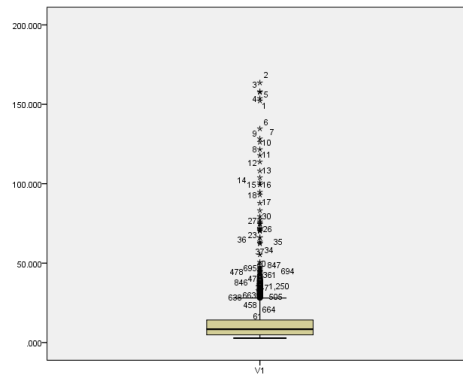


Figura 10. Ejemplo de diagrama box plot con presencia de outliers. Elaboración propia.

#### 2.4.4. Transformaciones no lineales

Las transformaciones no lineales permiten corregir la forma de la distribución, acercando a la normalidad a aquellos datos con distribuciones asimétricas y/o curtosis excesiva (Fornieles, 2013) con el objetivo de reducir la influencia de los outliers, reducir la escala de los efectos de interacción y que las variables presenten una relación lineal (Spínola, 2013), sin embargo esto no se va a cumplir en el 100% de los casos y se puede obtener diferentes tipos de relación como los de la Figura 11.

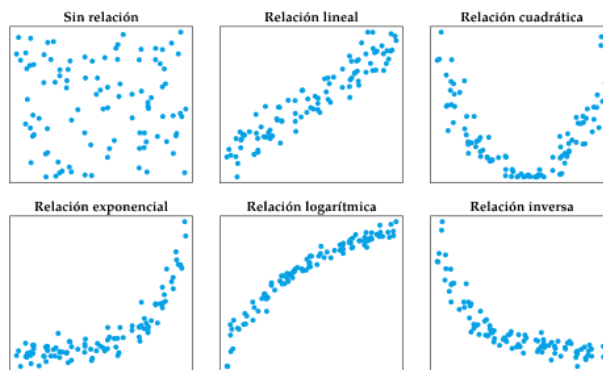


Figura 11. Diferentes diagramas de dispersión que indican el tipo de relación entre las variables.

En función de la distribución de los datos podemos realizar las transformaciones (Figura 12), se observa que mientras se tenga una simetría negativa o con cola hacia la izquierda (Figura 6), lo más conveniente es comprimir la escala de los valores pequeños y expandir los grandes, por

ello, se realiza la transformación  $x^2$ ; en cambio cuando se tenga una asimetría positiva o con cola hacia la derecha (Figura 6), se deberá expandir la escala de los valores pequeños y comprimir los grandes, ahí tenemos las transformaciones  $\sqrt{x}$ ,  $\ln x$  y  $1/x$ , el grado de transformación de estos va en orden creciente respectivamente cuando la distribución está muy sesgada, siendo la transformación  $\ln x$  la más utilizada en el campo de la estadística (Peña, 2014, p. 79), por ello se debe realizar el análisis de exploración de datos (EDA, sus siglas en inglés), utilizar los gráficos estadístico (como el histograma), analizar las medidas de tendencia central, así como las pruebas de normalidad.

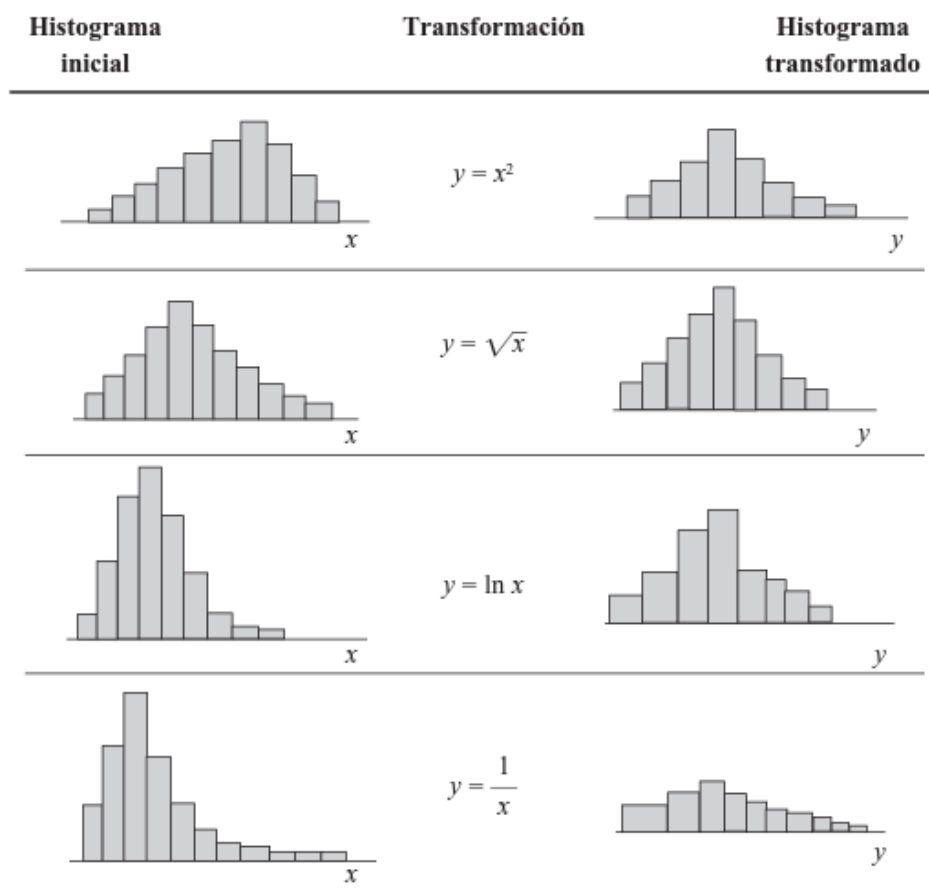


Figura 12. Los 4 tipos de transformaciones para datos que no cumplen con una distribución normal.

#### 2.4.5. Diagrama box plot

Son gráficos útiles para el análisis de la posición, distribución, asimetría, valores atípicos y longitud con la ventaja de poder comparar un gran conjunto de datos (Alperin, 2013).

En general el box plot se compone por la caja cuyos extremos son los cuartiles 25 y 75 y dentro de, un punto y/o línea horizontal correspondiente al 50% o mediana (Figura 13). Partiendo de los cuartiles que pertenecen a los extremos de la caja se trazan líneas hasta los datos más alejados llamados bigotes (inferior y superior).

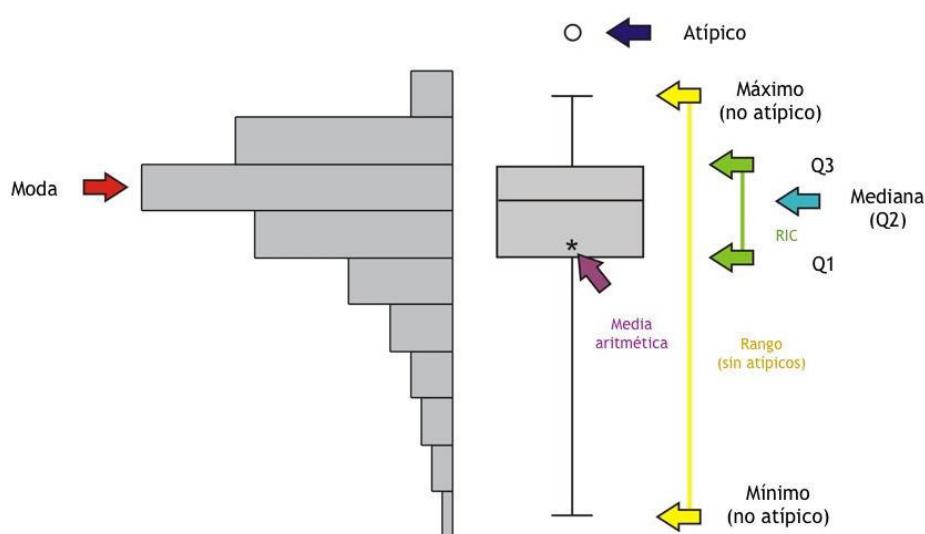


Figura 13. Comparación de las partes de un box plot y un histograma, con la ubicación de las medidas de tendencia central en una curva asimétrica con cola hacia la izquierda.

#### 2.4.6. Diagrama de barras apiladas

Para el análisis exploratorio de datos tenemos diferentes gráficos que en función del tipo de variable (Tabla 5) se tienen histogramas, diagramas de barras, diagramas de Pareto, entre otros. Si se tuviese variables cualitativas o nominales se utilizan los diagramas de barra, cuya ventaja principal es no ser afectado por los valores atípicos o outliers.

Una forma de resumir la información de los datos agrupados por grupos es mediante barras apiladas (Figura 14), sin embargo, cuando compara la contribución relativa de diferentes

categorías a un total, donde el total es igual al 100%, el diagrama de barras 100% apiladas puede ser especialmente útil cuando se trabaja con datos que tienen un gran número de categorías o cuando el objetivo es comprender la importancia relativa de cada categoría en el conjunto.

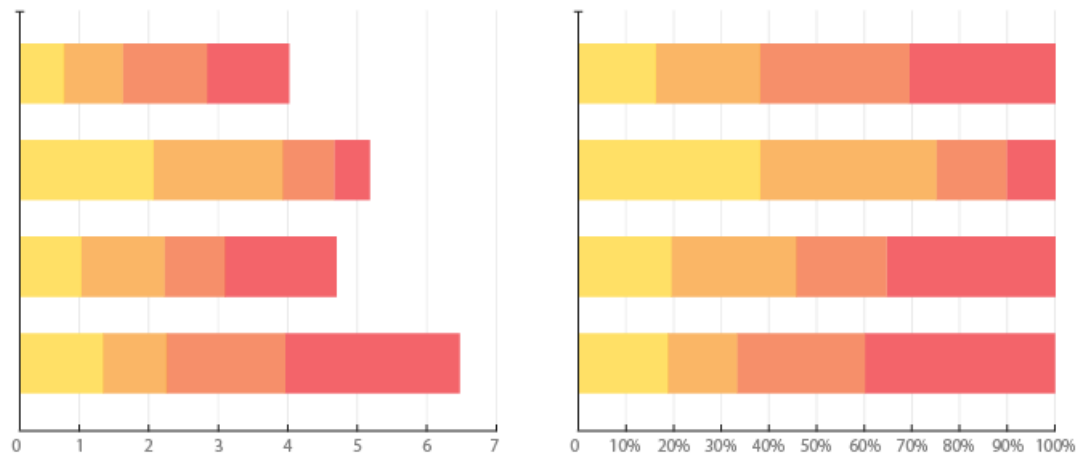


Figura 14. Diagrama de barras apiladas y 100%.

## Capítulo III. Hipótesis y variables

### 3.1. Hipótesis

Ho: El comportamiento del suelo de los relaves en función del  $Q_m$  y  $F_r$  podría ser influenciado por el método de disposición que estos tengan y cuya susceptibilidad a la licuefacción estática estimada con el  $\psi$  puedan analizarse a partir de análisis geotécnicos – estadísticos.

### 3.2. Variables

#### 3.2.1. Variables dependientes

El tipo de comportamiento de suelo normalizado, el parámetro de estado ( $\psi$ ), el coeficiente de permeabilidad, drenaje y la gravedad específica.

#### 3.2.2. Variables independientes

La resistencia de la punta normalizada ( $Q_m$ ), la tasa de fricción normalizada ( $F_r$ ), la presión intersticial ( $u_2$ ) y la concentración de sólidos.

## Capítulo IV. Metodología

### 4.1. Ubicación de datos

La data CPTu se obtuvo de la zona de playa de un depósito de relaves (Figura 15), Australia (1), Canadá (4), Chile (1), EE.UU. (1), México (1) y Perú (4), con profundidades variables según el alcance y necesidad de cada proyecto.

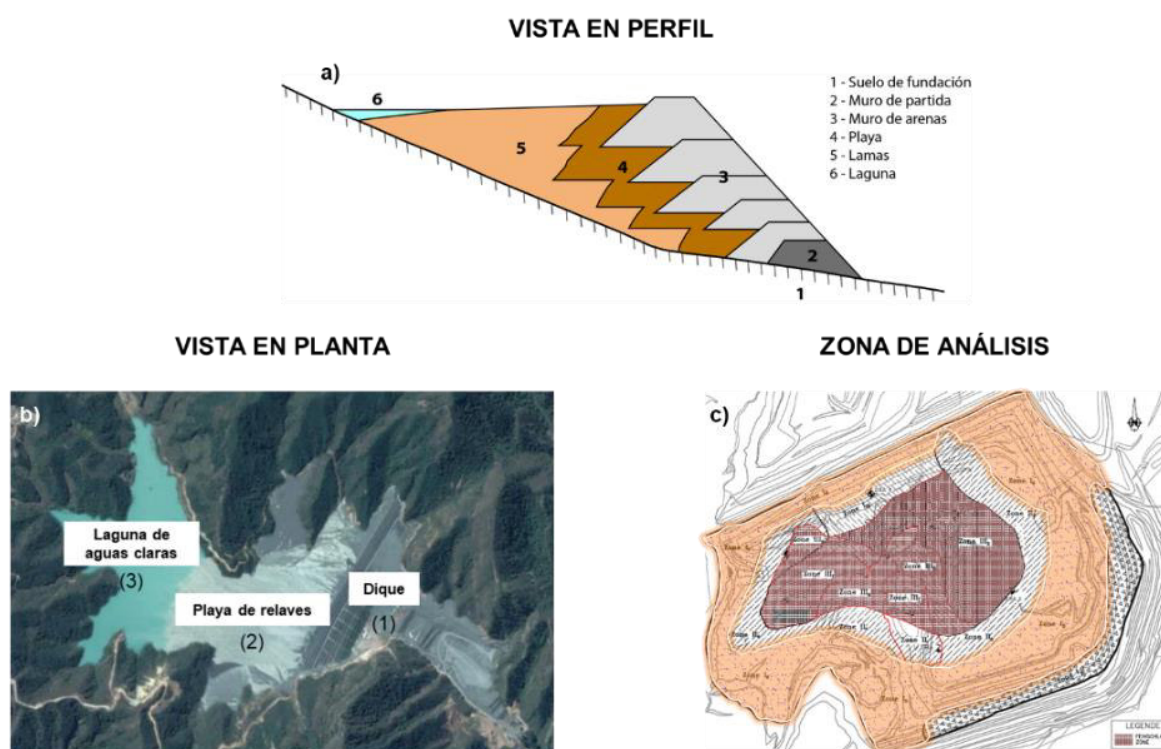


Figura 15. Ubicación de la playa de relaves, [a] vista en perfil (zona 4) y [b] en planta (zona 2, Extraído de: Qingting et al. (2020)) y [c] la zona de análisis (área naranja, Extraído de: Wels et al., 2000).

### 4.2. Población de estudio.

La recopilación de la base de datos se obtuvo del proyecto 00000507 de CONCYTEC, la cual presenta los valores en campo:  $q_t$ ,  $f_s$  y  $u_2$ .

Se recopilaron 3 ensayos CPTu en relaves pulpa, 3 en espesado, 3 en pasta y 3 en filtrados compactados para ser calculados; 6 ensayos CPTu de la investigación realizada por Robertson

P. K. en el 2016, 4 ensayos CPTu de la investigación realizada por Robertson P. K. en el 2010, 1 ensayo de los resultados del reporte técnico de Brumadinho (Robertson et al., 2019), 1 ensayo CPTu de los archivos confidenciales de ConeTec y los resultados del depósito de relaves Cadia

### 4.3. Recopilación bibliográfica

Reportes de Cias. Mras., investigaciones presentadas en conferencias como el Tailings and mine Waste, tesis de grado, artículos publicados en revistas científicas, informes, guías y normativa. Se recopiló la ubicación, número de ensayos CPTu, año del ensayo, concentración de sólidos ( $C_p\%$ ), tipo de disposición, gravedad específica ( $G_s$ ), tipo de yacimiento (Tabla 6), información de 6 casos históricos de fallas de licuefacción por flujo, 4 ejemplos de arenas de relaves, el punto CPTU-16-03N-R1 en Brumadinho, el CPT-N04 en Cadia y un ensayo CPTu de la base de datos de ConeTec (archivos confidenciales) para la comparación del parámetro de estado ( $\psi$ ) (Tabla 7).

| <i>No.</i> | <i>País</i> | <i>#<br/>CPTu</i> | <i>Año de<br/>ensayo</i> | <i><math>C_p\%</math></i> | <i>Disposición</i> | <i><math>G_s</math></i> | <i>Yacimiento</i>                            |
|------------|-------------|-------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------|-------------------------|----------------------------------------------|
| S01        | México      | 1                 | 2014                     | 25 - 30                   | S                  |                         | Epitermal de IS (Au-Ag)                      |
| S02        | Australia   | 1                 | 2021                     | 35 - 40                   | S                  |                         | Depósito de Fe                               |
| S03        | Canadá      | 1                 | 2013                     | 40                        | S                  |                         | Pórfido (Cu-Mo)                              |
| T01        | Chile       | 1                 | 2010                     | 45.1                      | T                  | 2.75                    | Pórfido (Cu)                                 |
| T02        | Chile       | 1                 | 2017                     | 51                        | T                  | 2.72                    | Pórfido (Cu)                                 |
| T03        | Perú        | 1                 | 2014                     | 55                        | T                  | 2.72                    | Pórfido (Cu)                                 |
| T04        | Canadá      | 1                 | 2016                     | 63                        | T                  | 3.1                     | VMS                                          |
| P01        | Perú        | 1                 | 2022                     | 65                        | P                  |                         | Sulfuro masivo<br>estratiforme (Zn-Pb-Cu-Ag) |
| P02        | Canadá      | 1                 | 2011                     | 66                        | P                  | 3.4*                    | VMS                                          |
| P03        | Perú        | 1                 | 2020                     | 70                        | P                  |                         | Skarn (Zn-Pb-Cu-Ag)                          |

|     |        |   |      |         |   |      |                         |
|-----|--------|---|------|---------|---|------|-------------------------|
| F01 | Canadá | 1 | 2010 | 83 - 84 | F |      | Pórfido (Cu)            |
| F02 | EE.UU  | 1 | 2022 | 85      | F |      | CRD (Zn-Pb-Ag)          |
| F03 | Perú   | 1 | 2022 | 86      | F |      | Epitermal de IS (Au-Ag) |
| N01 | EE.UU  | 1 | 2013 | ¿?      | N | 2.7* | Pórfido (Cu)            |
| N02 | Canadá | 1 | 2018 | ¿?      | N | 3.4* | VMS                     |
| N03 | EE.UU  | 1 | 2017 | ¿?      | N | 2.71 | Pórfido (Cu)            |
| N04 | Canadá | 1 | 2021 | ¿?      | N | 3.4* | VMS                     |
| N05 | EE.UU  | 1 | 2014 | ¿?      | N | 2.7* | Pórfido (Cu)            |
| N06 | Canadá | 1 | 2020 | ¿?      | N | 3.4* | VMS                     |
| N07 | EE.UU  | 1 | 2018 | ¿?      | N | 2.7* | Pórfido (Cu)            |

Tabla 6. Recopilación de los 24 relaves con su ensayo CPTu del proyecto 00000507 de CONCYTEC. S: relave pulpa, T: relave espesado, P: relave en pasta, F: relave filtrado compactado, ¿?: No se conoce, (\*): Valores asumidos (Vick, 1990).

| <i>No.</i> | <i>Q<sub>m</sub></i> | <i>F<sub>r</sub></i> | <i>I<sub>c</sub></i> | <i>Q<sub>m,cs</sub></i> | <i>Referencia</i>                                   |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------|
| A          | 5.0                  | 3.5                  | 3.3                  | 76                      | Number 15 (Robertson P. K., 2010)                   |
| B          | 40.0                 | 0.4                  | 2.0                  | 52                      | Number 19, 20, 21 (Robertson P. K., 2010)           |
| C          | 15.0                 | 1.5                  | 2.6                  | 56                      | Number 27 (Robertson P. K., 2010)                   |
| D          | 30.0                 | 0.8                  | 2.2                  | 48                      | Number 34 (Robertson P. K., 2010)                   |
| E          | 15.0                 | 1.0                  | 2.6                  | 56                      | Number 35 (Robertson P. K., 2010)                   |
| F          | 6.0                  | 1.0                  | 3.0                  | 53                      | Number 36 (Robertson P. K., 2010)                   |
| G          | 30.0                 | 0.7                  | 2.3*                 | 53*                     | Number 3 (Robertson P. K., 2016)                    |
| H          | 40.0                 | 0.3                  | 2.0*                 | 52*                     | Number 4 (Robertson P. K., 2016)                    |
| I          | 45.0                 | 0.4                  | 2.0*                 | 58*                     | Number 5 (Robertson P. K., 2016)                    |
| J          | 35.0                 | 0.7                  | 2.2*                 | 56*                     | Number 11 (Robertson P. K., 2016)                   |
| K**        | 19.5*                | 1.3*                 | 2.6*                 | 57*                     | Brumadinho: CPTU-16-03N-R1 (Robertson et al., 2019) |
| L**        | 18.7*                | 0.9*                 | 2.5*                 | 50*                     | ConeTec (archivos confidenciales)                   |

|   |   |   |   |   |                                         |
|---|---|---|---|---|-----------------------------------------|
| M | - | - | - | - | Cadia: CPT-N04 (Jefferies et al., 2019) |
|---|---|---|---|---|-----------------------------------------|

Tabla 7. Media y mediana de los valores de  $Q_m$ ,  $F_r$ ,  $I_c$  y  $Q_{m,cs}$  para los casos históricos de fallas de licuefacción de flujo, ejemplos de arenas de relaves, en Brumadinho, Cadia y de la base de datos de ConeTec. (\*): Valores calculados, (\*\*): Datos con valores de mediana.

#### 4.4. Muestreo de campo

Los datos de los ensayos CPTu fueron adquiridos mediante un piezocono del proyecto N°00000507, cabe mencionar que, en algunos ensayos se utilizó equipo de perforación para atravesar capas densas o compactas y luego se utilizó el equipo de empuje directo para el piezocono, posteriormente se seleccionaron los más representativos dentro de la zona de playa de relaves para realizar los análisis que la tesis plantea.

#### 4.5. Procesamiento post campo

La data obtenida del proyecto N°00000507 se corrigió y convirtió a las unidades requeridas para obtener los valores normalizados de resistencia y fricción. Para facilitar este proceso se creó un macro para la corrección, conversión y para los cálculos según la Norma ASTM D5778-20 (2020) y la 7<sup>ma</sup> Guía de CPT para Ingeniería geotécnica (Robertson & Cabal, 2022).

Los parámetros; cruciales fueron el  $Q_m$ ,  $F_r$  y  $\psi$ . Los dos primeros calculados a partir del  $q_t$  y  $f_s$  al remover el efecto de los esfuerzos verticales y efectivos; y el tercero se calculó a partir del  $Q_{m,cs}$  o por información recopilada de las referencias bibliográficas (Tabla 6).

En el primer análisis, los resultados del cálculo de los valores de  $Q_m$  y  $F_r$  fueron plotados en el gráfico SBTn del 2010 para identificar el tipo de suelo, según el  $I_c$ , presente en la playa de relaves a diferentes concentraciones de sólidos y a su vez dividiéndolos en relaves finos y gruesos tomando un umbral de  $I_c = 2.85$ . Finalmente para visualizar estos resultados de forma global y rápida, se utilizaron los gráficos boxplot, cuadros resumen de las medidas de tendencia

central del análisis exploratorio de datos, desviación estándar y cuantificación de relaves finos y gruesos a diferentes concentraciones de sólidos.

En el segundo análisis, el enfoque fue estimar el comportamiento contractivo-dilatante de los relaves a diferentes concentraciones de sólidos para estimar la susceptibilidad a la licuefacción estática en condiciones no drenadas, para ello, los resultados del cálculo de los valores de  $Q_m$  y  $F_r$  fueron ploteados en el gráfico SBTn del 2016 para identificar el tipo de suelo, según el  $I_B$ , presente en la playa de relaves a diferentes concentraciones de sólidos y a su vez dividiéndolos en relaves finos y gruesos tomando un umbral de  $I_c = 2.85$ , otro parámetro muy útil para estimar el comportamiento contractivo-dilatante es el  $\psi$ , tomando un valor límite en  $-0.05 \pm 0.02$  con intervalos cada  $0.05$ , y del cual se realizó el diagrama de barras 100% apiladas, cuadro resumen del comportamiento contractivo-dilatante diferentes concentraciones de sólidos y uno con la cuantificación y porcentajes de datos por cada intervalo del  $\psi$ .

El tercer análisis compara los resultados ya obtenidos con 6 casos históricos de fallas de licuefacción por flujo (calculado), 4 ejemplos de arenas de relaves (calculado), el punto CPTU-16-03N-R1 de Brumadinho (calculado), el CPT-N04 en Cadia (reporte técnico) y un ensayo CPTu de la base de datos de ConeTec (calculado), utilizando el gráfico SBTn del 2016 en base al  $Q_m$  y  $F_r$ , además se aplicó el diagrama de barras 100% apiladas para el  $\psi$  que fue calculado a partir del  $Q_{m,cs}$  o recopilado de las referencias bibliográficas.

## **4.6. Análisis de datos**

### **4.6.1. Primer Análisis: $Q_m$ , $F_r$ vs $C_p\%$**

Se contó con 1 ensayo CPTu representativo para cada tipo de relave según su concentración de sólidos ( $C_p\%$ ) sumando un total de 12 ensayos (Tabla 8), se asumió una gravedad específica ( $G_s$ ) de 2.65 (Robertson & Cabal, 2022, p. 39) debido a que no todos los casos de relaves tenían dicha información.

Los valores obtenidos del CPTu para este primer análisis fueron el  $Q_m$ ,  $F_r$  e  $I_c$ . Estos 3 valores serían comparados de acuerdo con  $C_p\%$ . En el caso del  $I_c$  se tomó como umbral un valor de 2.85 (Arroyo y Gens, 2021), dividiendo los resultados en relaves finos ( $I_c > 2.85$ ) y en relaves gruesos ( $I_c < 2.85$ ), ya que se obtiene una clasificación más distintiva en los relaves y una mejora significativa del porcentaje de finos drenados a comparación de un  $I_c = 2.6$  propuesto por Robertson (Tabla 9).

Posteriormente los resultados serían ubicados en el diagrama SBTn según la clasificación del suelo por el  $I_c$  (Robertson P. K., 2010) para evaluar la distribución, dispersión y tendencia conforme varía el  $C_p\%$  y con un umbral de 2.85.

| Code | Ubicación | $C_p\%$                                             | Tipo de relave | Yacimiento                                 |
|------|-----------|-----------------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------|
| S01  | México    | 25 – 30<br>(Fabian et al., 2015)                    | Pulpa          | Epitermal IS                               |
| S02  | Australia | 35 – 40<br>(2017)                                   | Pulpa          | Depósito de Fe                             |
| S03  | Canadá    | 40<br>(Klohn Crippen Berger, 2017)                  | Pulpa          | Pórfido de Cu-Mo                           |
| T02  | Chile     | 51<br>(Cacciuttolo y Marinovic, 2022)               | Espesado       | Pórfido de Cu-Mo                           |
| T03  | Perú      | 55<br>(Cacciuttolo y Marinovic, 2022)               | Espesado       | Pórfido de Au-Cu                           |
| T04  | Canadá    | 63<br>(Cacciuttolo y Marinovic, 2022)               | Espesado       | VMS Zn, Cu, Ag, Au                         |
| P01  | Perú      | 65<br>(Cacciuttolo y Marinovic, 2022)               | Pasta          | Sulfuros masivos estratiformes Zn-Pb-Cu-Ag |
| P02  | Canadá    | 66<br>(Myra Falls Mine Ltd., 2021)                  | Pasta          | VMS de Zn, Pb, Cu, Ag, Au                  |
| P03  | Perú      | 70<br>(Cacciuttolo y Marinovic, 2022)               | Pasta          | Skarn Zn, Pb, Cu, Ag                       |
| F01  | Canadá    | 83 – 84<br>(EBA Engineering Consultants Ltd., 2007) | Filtrado*      | Pórfido de Cu-Au                           |
| F02  | EE.UU.    | 85                                                  | Filtrado*      | CRD de Zn-Pb-Ag                            |

|     |      |                                      |           |              |
|-----|------|--------------------------------------|-----------|--------------|
|     |      | (2014)                               |           |              |
| F03 | Perú | 86<br>(Cacciuttolo y Pérez,<br>2022) | Filtrado* | Epitermal IS |

Tabla 8. Principales características de los 12 casos de relaves seleccionados de la Tabla 6 para el primer análisis. Los colores representan a los tipos de relaves por su  $C_p\%$ . (\*): Compactado.

| Valor umbral $I_c$             | % fino (por encima del umbral) | % grueso (por debajo del umbral) | % fino pero drenado | % grueso y drenado |
|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------|--------------------|
| 2.6<br>(Robertson P. K., 2016) | 47                             | 53                               | 42                  | 97.5               |
| 2.85<br>(Arroyo y Gens, 2021)  | 32                             | 68                               | 18.1                | 95.9               |

Tabla 9. Elección del umbral 2.85 (Arroyo y Gens, 2021) para la clasificación de los relaves en finos y gruesos en los diagramas SBTn.

Finalmente se aplicaron herramientas de la estadística para la visualización masiva utilizando el programa IBM SPSS y Excel. Este primer análisis se subdividió en las siguientes etapas:

#### 4.6.1.1. Análisis según $Q_m$ y $F_r$ , vs $C_p\%$ en el diagrama SBTn del 2010

La data resultante es ploteada en los diagramas SBTn (Robertson P. K., 2010) en base al  $Q_m$  y al  $F_r$  para evaluar su distribución, dispersión y tendencia con la variación del  $C_p\%$  y con un umbral de  $I_c=2.85$ .

#### 4.6.1.2. Análisis de boxplots y outliers

Para facilidades en la interpretación se utilizó el diagrama boxplot. En esta etapa se analiza de forma independiente los valores de  $Q_m$  y  $F_r$  según la clasificación de relaves por  $C_p\%$  e  $I_c=2.85$  antes y después de remover los valores atípicos u outliers.

#### 4.6.1.3. Análisis de las medidas de tendencia central y dispersión

En esta etapa se extrae la información de las medidas de tendencia central, tales como, media, moda y mediana, y la desviación estándar de forma independiente para los

valores de  $Q_m$  y  $F_r$ , y así evaluar las variaciones que puedan existir según la clasificación de relaves por  $C_p\%$  e  $I_c=2.85$  antes y después de la eliminación de los valores atípicos u outliers. El objetivo es determinar qué medida representa de forma óptima la data comparando la media y la mediana tomando en consideración la desviación estándar y sin clasificar finalmente los relaves en finos y gruesos.

#### **4.6.2. Segundo Análisis: contractivo/dilatante vs $C_p\%$**

Se obtuvo el valor del parámetro de estado para los relaves según su  $C_p\%$ . Este parámetro es importante ya que determina el comportamiento contractivo ( $> -0.05$ ) o dilatante ( $< -0.05$ ) del suelo para estimar el potencial de licuefacción teniendo en cuenta el límite contractivo – dilatante como  $\psi = -0.05 \pm 0.02$  (Jefferies & Been, 2015) (Shuttle & Cuning, 2008).

Otra manera de determinar el comportamiento contractivo – dilatante es con el límite CD con un valor de 70 en el gráfico SBTn según la clasificación del suelo por el  $I_B$  (Robertson P. K., 2016) para evaluar la distribución de datos dentro de la zona contractiva y/o dilatante y un umbral de 2.85.

##### **4.6.2.1. Análisis del comportamiento contractivo – dilatante con el diagrama SBTn del 2016**

La data resultante es plotada en los diagramas SBTn (Robertson P. K., 2016) en base al  $Q_m$  y al  $F_r$  para evaluar su distribución, dispersión y tendencia del comportamiento contractivo-dilatante a través de la variación del  $C_p\%$  y con un umbral de  $I_c=2.85$ .

##### **4.6.2.2. Análisis del parámetro de estado ( $\psi$ ) con barras 100% apiladas**

Como primer paso se estableció como rango para cada intervalo un valor de 0.05 por la ubicación estratégica del límite contractivo – dilatante.

El rango de los valores varía desde valores inferiores a -0.20 hasta valores superiores a 0.05 para los relaves pulpa, espesado, pasta y filtrado. Posteriormente se graficaron los resultados en un diagrama de barras 100% apiladas.

#### 4.6.3. Tercer análisis. Comparación con casos históricos y representativos

Resultó muy importante evaluar la distribución de los valores de  $Q_{in}$ ,  $F_r$  y el  $\psi$  de los relaves pulpa, espesado, pasta y filtrado compactado al compararlos con estos casos anteriormente estudiados para otorgar mayor fiabilidad a los resultados de esta investigación.

Para los casos del A – F realizados por Robertson P. K. (2010) los parámetros  $Q_{in}$ ,  $F_r$ ,  $I_c$  y  $Q_{in,cs}$  se encontraban sus valores promedio en el reporte técnico, los casos de G – J (Robertson P. K., 2016) solo se encontraron los valores promedio de  $Q_{in}$  y  $F_r$ , el caso K no se encontró valor promedio de ningún parámetro mencionado en la Tabla 10, sin embargo, se pudo extraer la data gracias al reporte técnico de acceso libre, el caso L pertenece a los archivos confidenciales de ConeTec y finalmente M el  $\psi$  fue el único valor que presentaba el reporte técnico. El objetivo de obtener estos parámetros es para el cálculo del  $\psi$  (Tabla 17) y compararlos con los resultados que se obtendrán en el Capítulo V.

| No. | $Q_{in}$ | $F_r$ | $I_c$ | $Q_{in,cs}$ | $\psi^*$ | Referencia                                |
|-----|----------|-------|-------|-------------|----------|-------------------------------------------|
| A   | 5.0      | 3.5   | 3.3   | 76          | -        | Number 15 (Robertson P. K., 2010)         |
| B   | 40.0     | 0.4   | 2.0   | 52          | -        | Number 19, 20, 21 (Robertson P. K., 2010) |
| C   | 15.0     | 1.5   | 2.6   | 56          | -        | Number 27 (Robertson P. K., 2010)         |
| D   | 30.0     | 0.8   | 2.2   | 48          | -        | Number 34 (Robertson P. K., 2010)         |
| E   | 15.0     | 1.0   | 2.6   | 56          | -        | Number 35 (Robertson P. K., 2010)         |
| F   | 6.0      | 1.0   | 3.0   | 53          | -        | Number 36 (Robertson P. K., 2010)         |
| G   | 30.0     | 0.7   | -     | -           | -        | Number 3 (Robertson P. K., 2016)          |
| H   | 40.0     | 0.3   | -     | -           | -        | Number 4 (Robertson P. K., 2016)          |
| I   | 45.0     | 0.4   | -     | -           | -        | Number 5 (Robertson P. K., 2016)          |
| J   | 35.0     | 0.7   | -     | -           | -        | Number 11 (Robertson P. K., 2016)         |

|   |   |   |   |   |             |                                   |
|---|---|---|---|---|-------------|-----------------------------------|
| K | - | - | - | - | -           | Brumadinho: CPTU-16-03N-R1        |
| L | - | - | - | - | -           | ConeTec (archivos confidenciales) |
| M | - | - | - | - | 0.08 - 0.10 | Cadia: CPT-N04                    |

Tabla 10. Seis casos históricos de fallas de licuefacción por flujo (A-F), 4 ejemplos de arenas de relaves (G-J), el punto CPTU-16-03N-R1 de Brumadinho (K), el CPT-N04 en Cadia (M) y un ensayo CPTu de la base de datos de ConeTec (L). (\*): Parámetro que será calculado.

#### 4.6.3.1. Comparación con los resultados en el SBTn del 2016

Se recopilieron los casos donde se ejecutaron ensayos CPTu en la playa de relaves, se agruparon en el gráfico SBTn del 2016 y se compararon con los resultados obtenidos para los 12 relaves seleccionados en esta investigación con la finalidad de que a partir de los casos ya estudiados, estimar cuál es el tipo de suelo y cómo se comportan los relaves a diferentes concentraciones de sólidos dentro de la playa de relaves en base a sus valores de  $Q_{tn}$  y  $F_r$ .

#### 4.6.3.2. Comparación con los resultados del $\psi$

Se recopilieron los casos donde se ejecutaron ensayos CPTu en la playa de relaves, se agruparon en el gráfico SBTn del 2016 y se compararon con los resultados obtenidos para los 12 relaves seleccionados en esta tesis, con la finalidad de que a partir de los casos ya estudiados, estimar cuál es el tipo de suelo y cómo estos se comportan en base a sus valores de  $Q_{tn}$  y  $F_r$  a diferentes concentraciones de sólidos.

## Capítulo V. Resultados

### 5.1. Resultados del primer análisis

En esta etapa se procede a describir el diagrama SBTn del 2010 con los valores de  $Q_m$  y  $F_r$  para los relaves pulpa, espesado, pasta y filtrado compactado, analizarlos mediante cuadros resumen del procesamiento estadístico post campo para finalmente comparar la relación de estos parámetros a diferentes concentraciones de sólidos, estimar el tipo de suelo y qué valor representa mejor la distribución de todos los datos tomando en cuenta un umbral  $I_c = 2.85$ .

#### 5.1.1. Resultados de los valores de $Q_m$ , $F_r$ vs $C_p\%$ en el diagrama SBTn del 2010

De la Figura 27, desde el punto de vista geotécnico, cuando se clasifican los suelo según el  $I_c$  en el diagrama SBTn (Robertson P. K., 2010), mayormente los relaves a diferentes  $C_p\%$  se agrupan dentro de los suelos tipo 2 y 6. Existe un aumento del  $Q_m$  y  $F_r$  conforme incrementa la concentración de sólidos, siendo más resaltante en los relaves filtrados compactados, aumentando la densidad del suelo y la tasa de sobreconsolidación (OCR) y presentando una tendencia hacia los suelos del tipo 8 y 9, y cuando el  $C_p\%$  disminuye, como sucede en el relave S01, el suelo presenta mayor sensibilidad debido a una mayor presión intersticial ( $u_2$ ) y por lo tanto los valores de  $Q_m$  y  $F_r$  disminuyen.

Posteriormente se clasificaron los relaves según el umbral  $I_c = 2.85$ ; para aquellos relaves que poseían un  $I_c > 2.85$  serían clasificados como relaves finos (Arroyo y Gens, 2021). Los resultados de la Figura 17 muestran que todos los tipos de relaves  $C_p\%$  presentan relaves finos, sin embargo los relaves filtrados compactados tienen una cantidad menor a comparación de los otros tipos.

Los relaves finos se encuentran como suelos tipo 1 hasta con una reducida zonificación con los suelos tipo 4; por ello con base a la Tabla 3, podemos decir que son suelos de grano fino que, conforme va disminuyendo  $C_p\%$ , la sensibilidad aumenta, la densidad es menor así como el

OCR; además de que la presión intersticial es mayor debido a que el coeficiente de permeabilidad en estos tipos de suelo va desde  $3 \cdot 10^{-10}$  a  $10^{-7}$  m/s (Robertson & Cabal, 2015) y de acuerdo con la Tabla 2 podemos decir que estos relaves presentan un grado de permeabilidad muy bajo o prácticamente impermeable con propiedades de drenaje prácticamente imperceptibles; es decir presenta condiciones no drenadas.

Finalmente aquellos relaves que poseen un  $I_c < 2.85$  fueron clasificados como relaves gruesos (Arroyo y Gens, 2021). Los resultados muestran que todos los tipos de relaves  $C_p\%$  presentan relaves gruesos, sin embargo en los relaves filtrados compactados casi en su totalidad presentan este tipo de relaves y se encuentran desde suelos tipo 4 hasta los suelos tipo 9 (Figura 18).

Con base a la Tabla 3, podemos decir que son suelos de grano grueso o sobreconsolidados / densificados o rígidos; por ello cuando aumenta el  $C_p\%$ , la sensibilidad decrece, la densidad es mayor y el OCR también, así como que la presión intersticial va disminuyendo en capas donde el suelo tiende a tener un comportamiento arenoso pues el coeficiente de permeabilidad va desde  $1 \cdot 10^{-5}$  a  $1$  m/s (Robertson & Cabal, 2015) cuyo grado de permeabilidad va desde bajo a alto con propiedades de drenaje variables entre franca-pobre a buena (Tabla 2); es decir, presenta condiciones más drenadas, sin embargo mientras más mixto sea el suelo, el coeficiente de permeabilidad se encuentra entre valores de  $1 \cdot 10^{-9}$  a  $1 \cdot 10^{-5}$  m/s (Robertson & Cabal, 2015) clasificándolos como suelos con grado de permeabilidad muy bajo o prácticamente impermeable con propiedades de drenaje prácticamente imperceptibles (Tabla 2).

Conforme aumente la compactación (suelos tipo 8 y 9), el coeficiente de permeabilidad va desde  $1 \cdot 10^{-9}$  a  $1 \cdot 10^{-7}$  m/s (Robertson & Cabal, 2015) con un grado de permeabilidad muy bajo o prácticamente impermeable con propiedades de drenaje prácticamente imperceptibles.

Así, de un total de 9499 datos 5229 datos fueron clasificados como relaves finos y 4270 como relaves gruesos representando el 55% y 45% respectivamente. Los datos clasificados como

relaves pulpa son 2623 de los cuales 1718 son relaves finos y 905 son gruesos, los que son clasificados como relaves espesados son 2320 donde 1847 son finos y 473 son gruesos; los relaves pasta constan de 2688 datos siendo 1539 finos y 1149 gruesos; y 1868 datos pertenecen a los relaves filtrados compactados donde 125 son finos y 1743 son gruesos (Tabla 11).

| Tipos de relaves        | Pulpa | Espesado | Pasta | Filtrado | Total       | %           |
|-------------------------|-------|----------|-------|----------|-------------|-------------|
| Relaves finos           | 1718  | 1847     | 1539  | 125      | <b>5229</b> | <b>55%</b>  |
| Relaves gruesos         | 905   | 473      | 1149  | 1743     | <b>4270</b> | <b>45%</b>  |
| Total (finos y gruesos) | 2623  | 2320     | 2688  | 1868     | <b>9499</b> | <b>100%</b> |

Tabla 11. Cantidad de datos totales por cada tipo de relaves por  $C_p\%$  para relaves “finos” y “gruesos”.



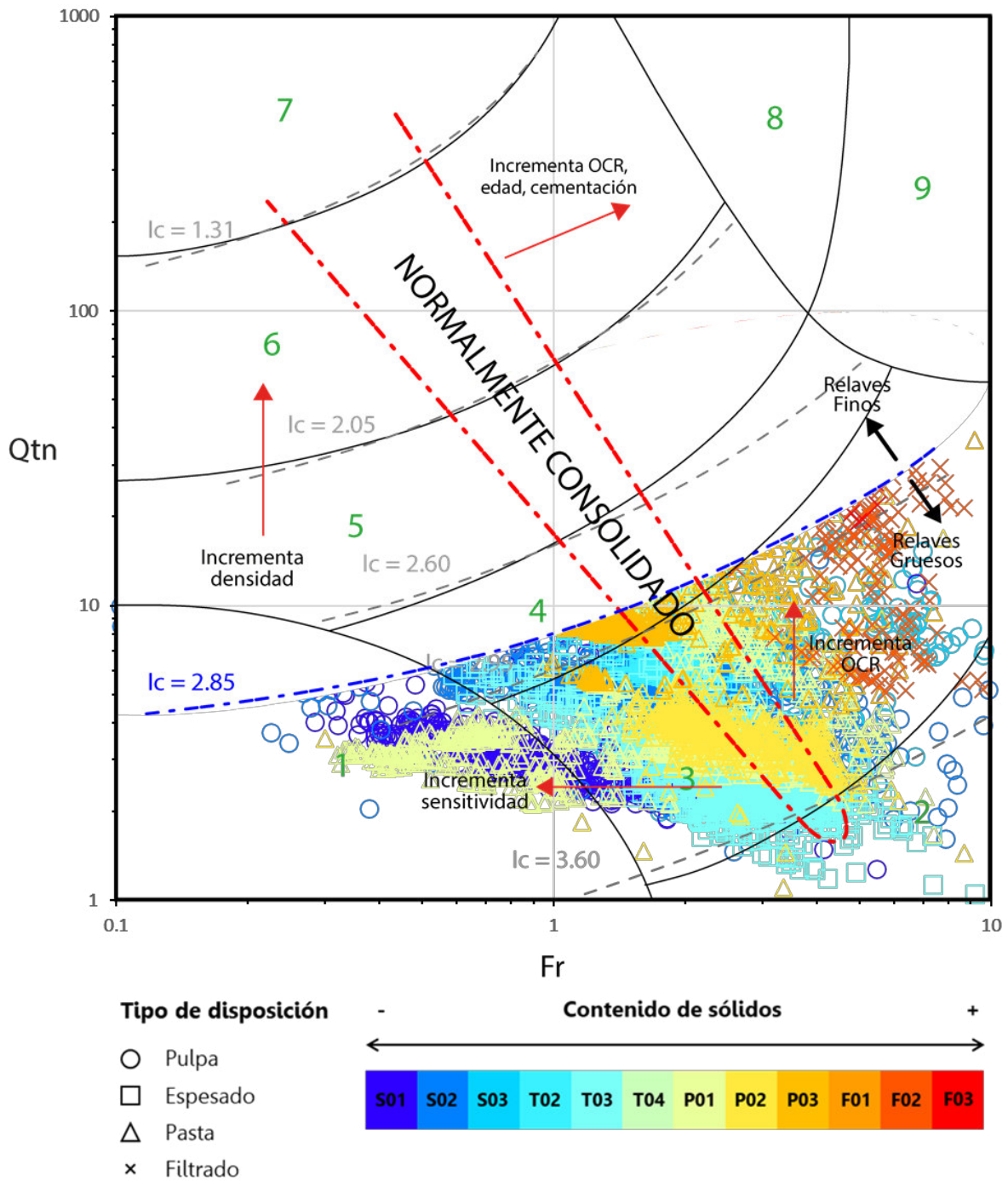


Figura 17. Distribución de los valores de  $Q_{tn}$  y  $F_r$  para los relaves “finos” ( $I_c > 2.85$ ) en el diagrama SBTn según el  $I_c$  (línea negra). Los colores representan al  $C_p\%$  de la Tabla 8 y la línea discontinua azul representa el límite del umbral  $I_c = 2.85$ .

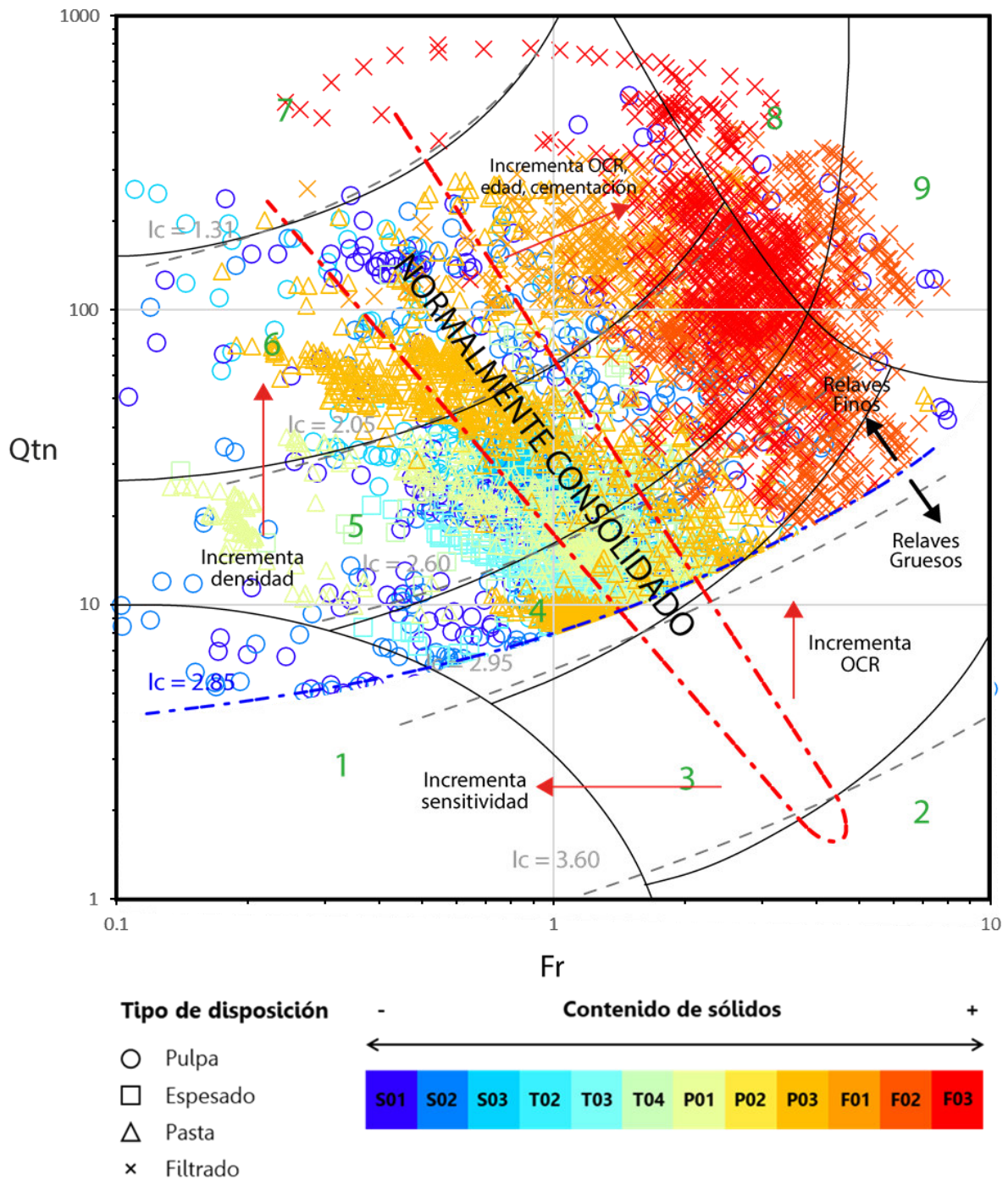


Figura 18. Distribución de los valores de  $Q_m$  y  $F_r$  para los relaves “gruesos” ( $I_c < 2.85$ ) en el diagrama SBTn según el  $I_c$  (línea negra). Los colores representan al  $C_p\%$  de la Tabla 8 y la línea discontinua azul representa el límite del umbral  $I_c = 2.85$ .

### 5.1.2. Resultados de boxplots y outliers

En esta investigación, los gráficos boxplot sirvieron para explorar y comparar la agrupación de los valores de  $Q_m$  y  $F_r$  a diferentes concentraciones de sólidos y con un umbral  $I_c=2.85$ , su simetría, outliers, y las medidas de tendencia central de manera rápida y global permitiendo así deducir el comportamiento geotécnico de estos.

Al analizar independientemente los valores de  $Q_m$  y  $F_r$  se determinó que existe una variación mínima de estos parámetros tanto para los relaves pulpa, espesado y pasta a diferencia de los relaves filtrados compactados.

En la Figura 19 y Figura 20 se muestran los boxplots con outliers en los relaves finos ( $I_c > 2.85$ ) para los valores de  $Q_m$  y  $F_r$  respectivamente. Los resultados de la Figura 19 evidencian una distribución no normal a una escala para el  $Q_m$  de 0 a 30 con sesgo positivo o con cola hacia la derecha; es decir, posee pocos datos con valores altos y gran cantidad de valores pequeños. Los valores de media y mediana en el caso de los relaves pulpa, espesado y pasta son similares (aproximadamente entre 2 a 5) con la presencia de outliers y los filtrados compactados presentan valor de media y mediana de 14 aproximadamente. Se observa además que la dimensión de la caja de los filtrados compactados es más grande a comparación de los otros 3 tipos debido a la cantidad de datos que son clasificados como finos y presentan mayor dispersión demostrando una mayor variabilidad de este parámetro cuando son relaves finos. Hay que tener en cuenta que el valor del  $Q_m$  va desde 1 hasta 1000 en escala logarítmica.

La Figura 20 al igual que en la anterior figura, evidencia una distribución no normal a una escala para el  $F_r$  de 0 a 10 con sesgo positivo donde los valores de media y mediana de los relaves pulpa, espesado y pasta son similares (entre 1.5 a 2.5) con presencia de outliers a diferencia de los filtrados compactados que presentaron valor de media y mediana alrededor de un valor de 5.5. Se observa que la dimensión de las cajas para estos relaves es similar

demostrando que no hay mucha variabilidad de este parámetro cuando son relaves finos, teniendo en cuenta que el rango para el  $F_r$  de 0.1 a 10 en escala logarítmica.

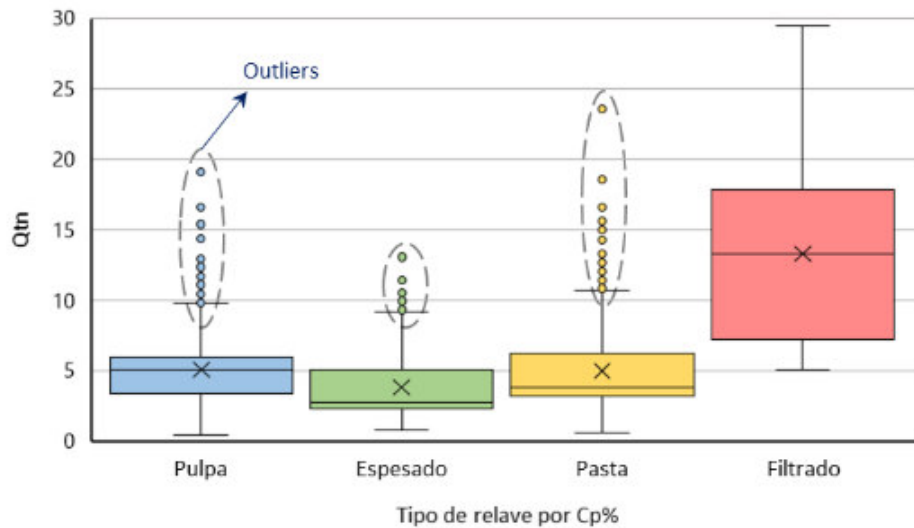


Figura 19. Boxplots de  $Q_m$  por  $C_p\%$  para relaves finos con outliers.

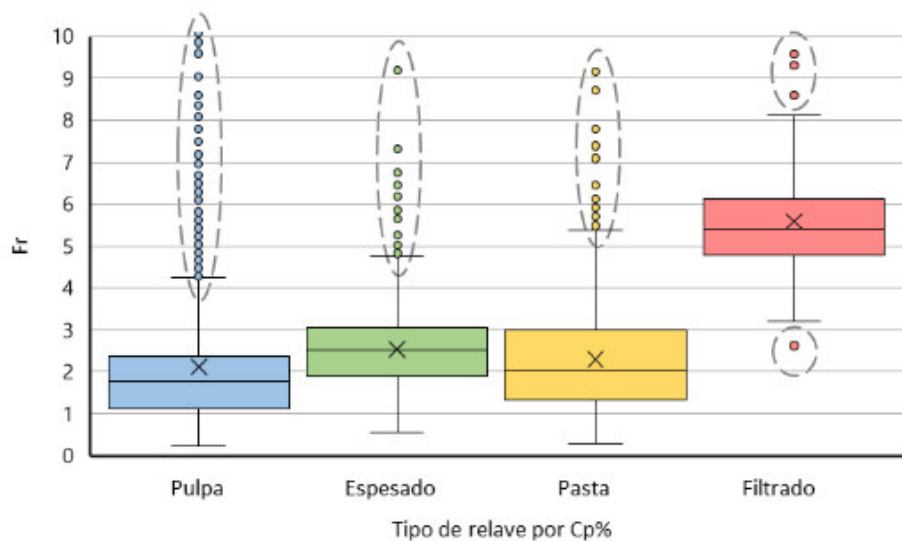


Figura 20. Boxplots de  $F_r$  por  $C_p\%$  para relaves finos con outliers.

Cuando se clasifican los relaves como gruesos para los valores de  $Q_m$  y  $F_r$  tal y como se muestra en la Figura 21 y en la Figura 22 respectivamente, la escala de estos varía siendo en  $Q_m$  desde 0 a 400 con presencia de outliers. Al igual que en los relaves finos estos presentan distribución no normal con sesgo positivo donde los valores de media y mediana en los relaves pulpa,

espesado y pasta son similares (entre 20 a 50) y para los filtrados compactados están alrededor entre 120 a 150.

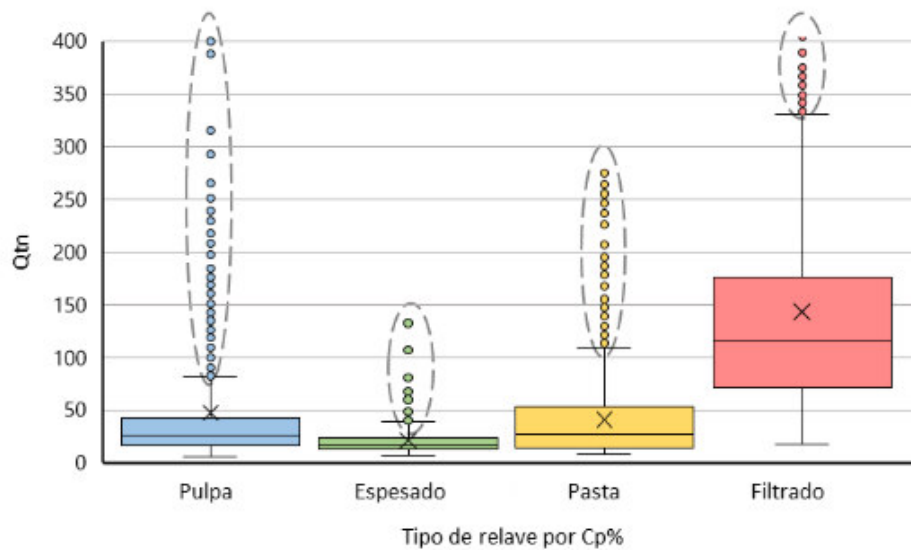


Figura 21. Boxplots de  $Q_m$  por  $C_p\%$  para relaves gruesos con outliers.

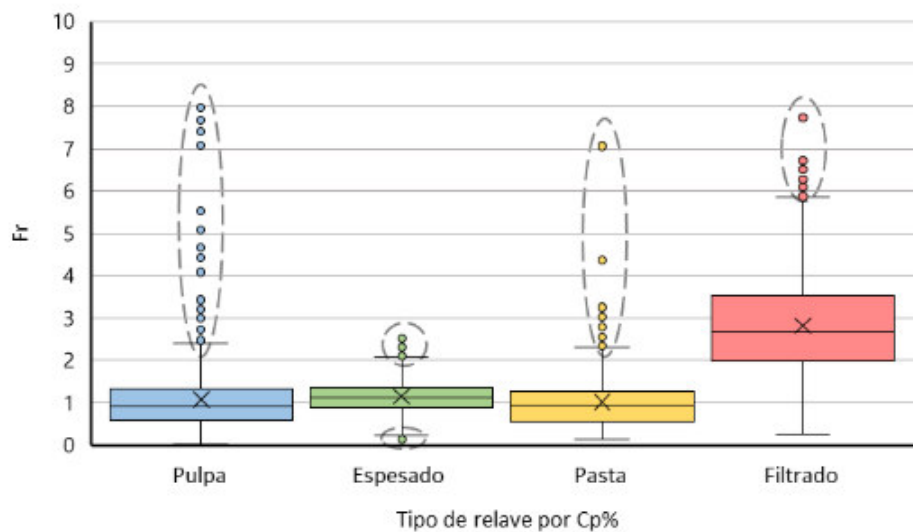


Figura 22. Boxplots de  $F_r$  por  $C_p\%$  para relaves gruesos con outliers.

Se observa además que el tamaño de las cajas para los relaves pulpa, espesado y pasta son similares demostrando que los valores de este parámetro no presentan mucha variabilidad a diferencia de los filtrados compactados, sin embargo, hay que tener en cuenta que el valor del  $Q_m$  va desde 1 hasta 1000 en escala logarítmica. Para el  $F_r$  se mantuvo la misma escala de 0 a

10 (Figura 22) y al igual que en los gráficos anteriores los valores de media y mediana para los relaves pulpa, espesado y pasta fueron similares con valores alrededor de 1, a diferencia de los filtrados compactados con valores entre 2 y 3, con distribución no normal y sesgo positivo.

Dado a la distribución no normal de estos parámetros cuando son clasificados como relaves finos y gruesos, se removieron los outliers donde el porcentaje de outliers eliminados varía entre 0 – 32.77% (Tabla 12), estos outliers representan valores altos y bajos en el relave dado a presencia de capas más compactas, mayor presencia de presión de agua intersticial, o capas más arcillosas aumentando la fricción del suelo.

| Tipos de relaves               | Pulpa |       | Espesado |       | Pasta |       | Filtrado |       | Total       | %           |
|--------------------------------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|----------|-------|-------------|-------------|
| Parámetros                     | $Q_m$ | $F_r$ | $Q_m$    | $F_r$ | $Q_m$ | $F_r$ | $Q_m$    | $F_r$ |             |             |
| Relaves finos (con outliers)   | 1718  |       | 1847     |       | 1539  |       | 125      |       | <b>5229</b> | <b>55%</b>  |
| % Outliers eliminados          | 3.84  | 8.85  | 32.77    | 1.52  | 30.21 | 2.21  | 0        | 4.8   | -           | -           |
| Relaves gruesos (con outliers) | 905   |       | 473      |       | 1149  |       | 1743     |       | <b>4270</b> | <b>45%</b>  |
| % Outliers eliminados          | 22.54 | 6.41  | 18.18    | 3.81  | 6.79  | 5.22  | 7.86     | 1.84  | -           | -           |
| Total (finos y gruesos)        | 2623  |       | 2320     |       | 2688  |       | 1868     |       | <b>9499</b> | <b>100%</b> |

Tabla 12. Cantidad de datos totales por cada tipo de relaves por  $C_p\%$  para relaves “finos” y “gruesos”, y porcentaje de datos perdidos de los valores de  $Q_m$  y  $F_r$  post procesamiento geoestadístico.

En la Figura 23 y Figura 24 se exponen los gráficos boxplot de los relaves finos para los parámetros de  $Q_m$  y  $F_r$  sin la presencia de outliers donde se observa que a pesar de haber sido removidos mantienen una distribución no normal con sesgo positivo y la mediana presentó continuidad. Para los relaves espesados la dimensión de la caja se redujo causado por la reducción de estos outliers que evidenciaban una mayor distribución y que afectaron al valor de la media. Estas características se ven reflejadas también en la Figura 25 y Figura 26.

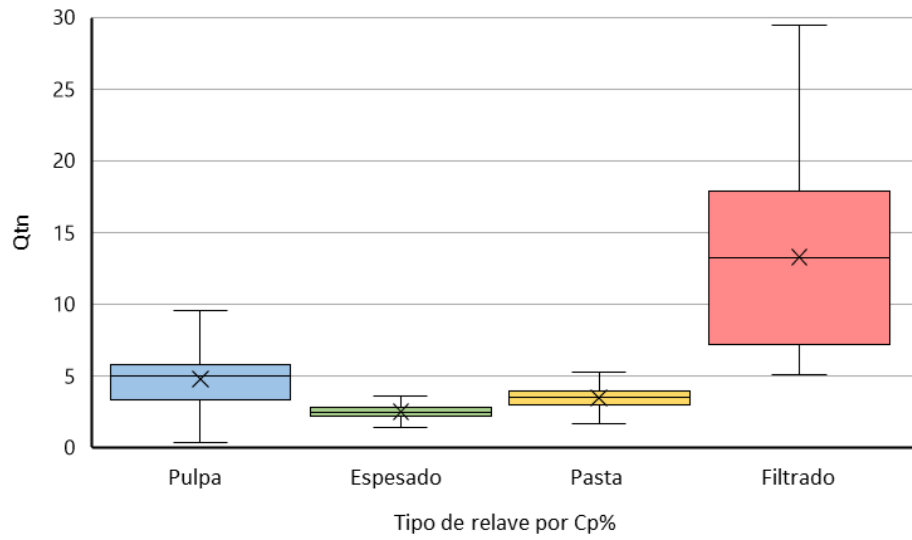


Figura 23. Boxplots de los valores de  $Q_m$  por  $C_p\%$  para relaves finos sin outliers.

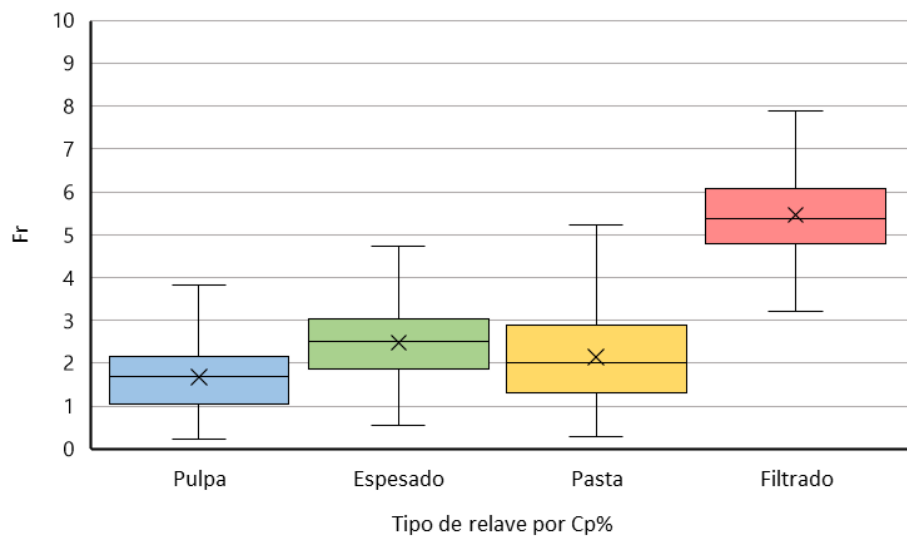


Figura 24. Boxplots de los valores de  $F_r$  por  $C_p\%$  para relaves finos sin outliers.

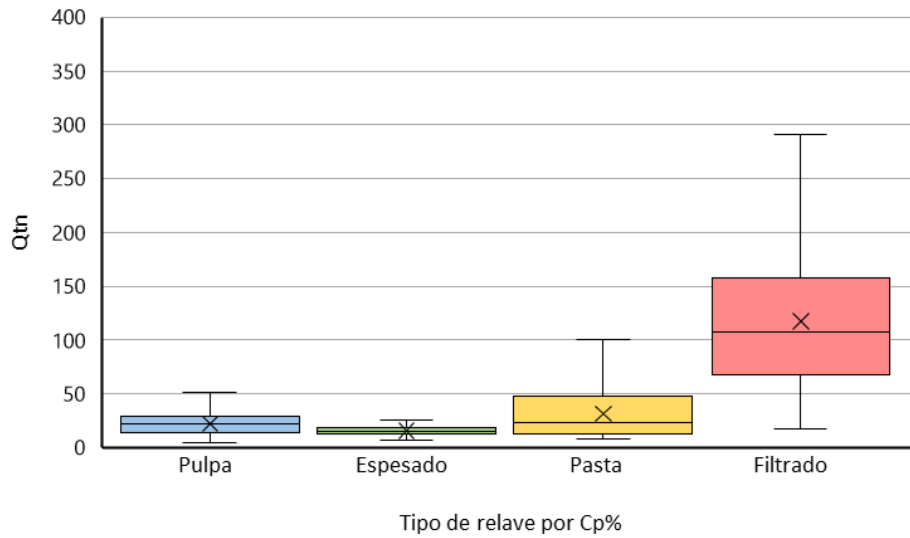


Figura 25.Boxplots de los valores de  $Q_{tn}$  por  $C_p\%$  para relaves gruesos sin outliers.

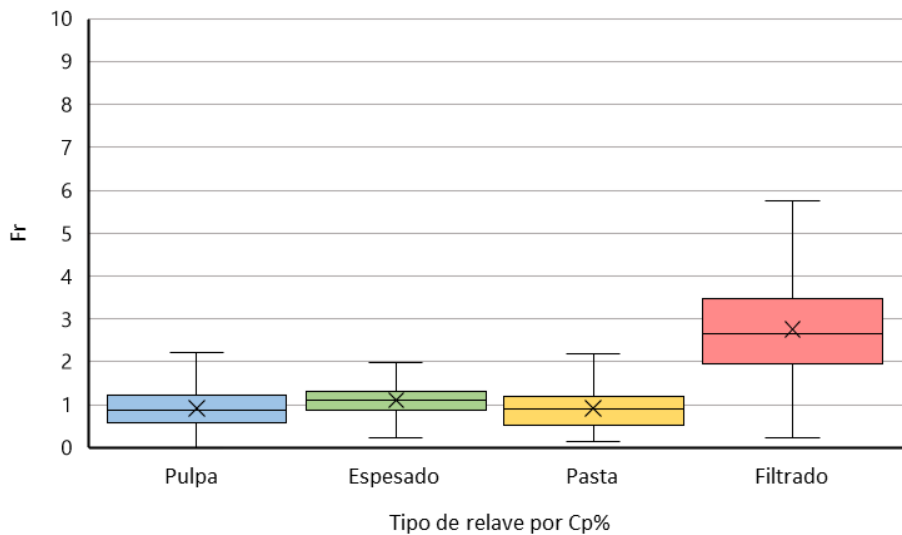


Figura 26. Boxplots de los valores de  $F_r$  por  $C_p\%$  para relaves gruesos sin outliers.

### 5.1.3. Resultados de las medidas de tendencia central y de dispersión

Como se demostró en los resultados de los gráficos de boxplot, la presencia de outliers afecta el cambio de la media como medida de tendencia central a diferencia de la mediana que presenta continuidad con la presencia o eliminación de estos. En la Tabla 13 se presenta un

resumen de las medidas de tendencia central para los relaves pulpa, espesado, pasta y filtrado divididos en finos y gruesos, antes y después de remover los outliers.

Asimismo, se calculó la desviación estándar para los valores de  $Q_m$  y  $F_r$  para los relaves pulpa, espesado, pasta y filtrado cuando son divididos como finos y gruesos antes y después de remover los outliers (Tabla 14). Con la desviación estándar se analizará la dispersión de los datos respecto a la media.

Finalmente se elaboró la Tabla 15 donde se resume toda la data sin dividirla en finos y gruesos en base a su media, mediana, moda y desviación estándar para comparar estos resultados con la Tabla 13 para analizar qué valor representa de forma óptima los valores de  $Q_m$  y  $F_r$  por cada tipo de relaves a diferentes concentraciones de sólidos.

| Medidas de<br>tendencia<br>central    | Media        | Mediana | Moda   | Media    | Mediana | Moda   | Media  | Mediana | Moda   | Media    | Mediana | Moda    |        |
|---------------------------------------|--------------|---------|--------|----------|---------|--------|--------|---------|--------|----------|---------|---------|--------|
| Tipos de<br>relave                    | Pulpa        |         |        | Espesado |         |        | Pasta  |         |        | Filtrado |         |         |        |
| Relaves finos<br>( $1c < 2.85$ )      | Con outliers |         |        |          |         |        |        |         |        |          |         |         |        |
|                                       | $Q_m$        | 5.042   | 5.022  | 2.797    | 3.795   | 2.754  | 2.648  | 4.984   | 3.847  | 3.592    | 13.266  | 13.257  | -      |
|                                       | $F_r$        | 2.119   | 1.776  | 1.188    | 2.537   | 2.535  | 3.485  | 2.292   | 2.044  | 1.855    | 5.583   | 5.417   | 5.351  |
|                                       | Sin outliers |         |        |          |         |        |        |         |        |          |         |         |        |
|                                       | $Q_m$        | 4.009   | 3.325  | 2.331    | 2.494   | 2.453  | 2.648  | 3.472   | 3.458  | 3.592    | 13.266  | 13.257  | -      |
|                                       | $F_r$        | 2.207   | 2.076  | 2.112    | 2.488   | 2.519  | 3.485  | 2.151   | 2.018  | 1.855    | 5.470   | 5.367   | 5.351  |
| Relaves gruesos<br>( $1c \geq 2.85$ ) | Con outliers |         |        |          |         |        |        |         |        |          |         |         |        |
|                                       | $Q_m$        | 47.200  | 25.545 | 11.517   | 20.758  | 15.974 | 16.333 | 40.838  | 26.491 | 8.657    | 143.122 | 114.590 | 96.809 |
|                                       | $F_r$        | 1.081   | 0.908  | 0.812    | 1.152   | 1.132  | 1.058  | 1.014   | 0.951  | 1.070    | 2.817   | 2.668   | 2.490  |
|                                       | Sin outliers |         |        |          |         |        |        |         |        |          |         |         |        |
|                                       | $Q_m$        | 22.366  | 21.668 | 11.517   | 15.651  | 14.633 | 16.333 | 31.547  | 22.984 | 8.657    | 117.517 | 107.363 | 96.809 |
|                                       | $F_r$        | 0.920   | 0.871  | 0.812    | 1.114   | 1.117  | 1.058  | 0.916   | 0.903  | 1.070    | 2.754   | 2.645   | 2.490  |

Tabla 13. Comparación de las medidas de tendencia central antes y después de la eliminación de outliers para los valores de  $Q_m$  y  $F_r$  por cada tipo de relaves por  $C_p\%$  para relaves “finos” y “gruesos”.

De la Tabla 13 se observa que el valor de la media es afectado por los outliers en los valores de  $Q_m$  y  $F_r$  corroborado con los valores de desviación estándar presentados en la Tabla 14, si

bien este valor es reducido cuando son relaves finos, es más amplio cuando son clasificados como relaves gruesos; sin embargo, el valor de la mediana no presenta una variación excesiva, por lo que hasta donde se presentan estos resultados, la mediana representa de forma óptima el equilibrio de la data con presencia o al remover los outliers; sin embargo, se debe tener en cuenta la cantidad de datos que se encuentran clasificados como finos y gruesos para cada tipo de relave.

| Tipo de relave                   | Pulpa  |       | Espesado |       | Pasta  |       | Filtrado |       |
|----------------------------------|--------|-------|----------|-------|--------|-------|----------|-------|
| Parámetros                       | $Q_m$  | $F_r$ | $Q_m$    | $F_r$ | $Q_m$  | $F_r$ | $Q_m$    | $F_r$ |
| Relaves finos ( $I_c > 2.85$ )   |        |       |          |       |        |       |          |       |
| $\sigma$ con outliers            | 2.136  | 1.944 | 2.163    | 0.887 | 2.785  | 2.517 | 6.375    | 1.194 |
| $\sigma$ sin outliers            | 2.483  | 1.092 | 0.430    | 0.790 | 0.642  | 1.141 | 6.375    | 0.971 |
| $\Delta\sigma$                   | 0.346  | 0.851 | 1.733    | 0.097 | 2.144  | 1.376 | 0.000    | 0.223 |
| Relaves gruesos ( $I_c < 2.85$ ) |        |       |          |       |        |       |          |       |
| $\sigma$ con outliers            | 58.664 | 0.863 | 14.201   | 0.394 | 42.937 | 0.654 | 112.945  | 1.194 |
| $\sigma$ sin outliers            | 9.923  | 0.481 | 4.410    | 0.338 | 22.071 | 0.473 | 64.416   | 1.083 |
| $\Delta\sigma$                   | 48.741 | 0.383 | 9.792    | 0.056 | 20.866 | 0.181 | 48.528   | 0.110 |

Tabla 14. Comparación de la desviación estándar antes y después de la eliminación de outliers para los valores de  $Q_m$  y  $F_r$  por cada tipo de relaves por  $C_p\%$  para relaves “finos” y “gruesos”.

|       |          | Pulpa  | Espesado | Pasta  | Filtrado |
|-------|----------|--------|----------|--------|----------|
| $Q_m$ | Media    | 19.587 | 7.254    | 20.310 | 134.433  |
|       | Mediana  | 5.974  | 3.269    | 8.540  | 108.318  |
|       | Moda     | 2.797  | 2.648    | 3.592  | 96.809   |
|       | $\sigma$ | 39.891 | 9.565    | 33.269 | 113.836  |
| $F_r$ | Media    | 1.761  | 2.255    | 1.745  | 3.002    |
|       | Mediana  | 1.420  | 2.214    | 1.377  | 2.785    |
|       | Moda     | 0.901  | 3.485    | 0.798  | 2.490    |
|       | $\sigma$ | 1.725  | 0.985    | 2.052  | 1.360    |
| Total |          | 2623   | 2320     | 2688   | 1868     |

Tabla 15. Comparación de media, mediana, moda y desviación estándar de los valores de  $Q_m$  y  $F_r$  por cada tipo de relaves por  $C_p\%$ .

Dado a la diferencia en la cantidad de datos cuando son relaves finos y gruesos por cada tipo de relave, se decidió analizar en conjunto toda la data pero considerando los tipos de relaves;

es decir, pulpa, espesado, pasta y filtrado compactado sin remover los outliers para los valores de  $Q_m$  y  $F_r$ .

Analizando la Tabla 15 podemos deducir que la mediana de  $Q_m$  y  $F_r$  para los relaves pulpa (5.974; 1.420), espesado (3.269; 2.214) y pasta (8.540; 1.377) son similares a los valores de la mediana para los relaves finos (Tabla 13) concluyendo que estos relaves presentan suelos tipo 1 a 4, con mayor presión intersticial y condiciones no drenadas. En cambio los relaves filtrados compactados el valor de la mediana para el  $Q_m$  (108.3018) y  $F_r$  (2.785) es similar a los valores de los relaves gruesos, concluyendo que este tipo de relaves presentan suelos tipo 4 a 9, con menor presión intersticial y condiciones drenadas.

## 5.2. Resultados del segundo análisis

El comportamiento contractivo – dilatante se pudo estimar de 2 formas: con el gráfico SBTn del 2016 y con el parámetro de estado ( $\psi$ ), y finalmente se representó este último con el diagrama de barras 100% apiladas para los relaves a diferentes concentraciones de sólidos.

Cuando se clasifican los suelos según el  $I_B$  (Robertson P. K., 2016) se estima el comportamiento contractivo – dilatante tomando un límite  $CD = 70$ , solo se requieren los valores de  $Q_{tn}$  y  $F_r$ ; y para el parámetro de estado ( $\psi$ ) se realizó el cálculo en base al  $Q_{m,cs}$ , este parámetro cuando posee un valor de  $\psi = -0.05 \pm 0.02$  representa el límite de un suelo contractivo – dilatante del suelo. Dado al contenido denso se visualizó el  $\psi$  por cada tipo de relaves con el diagrama de barras 100% apiladas (Figura 28). El rango de intervalo tuvo un valor de 0.05 seleccionado estratégicamente por el límite de un suelo contractivo – dilatante.

Estimar el comportamiento contractivo – dilatante es importante para determinar la susceptibilidad a la licuefacción estática.

### ***5.2.1. Resultados del análisis del comportamiento contractivo – dilatante con el diagrama SBTn del 2016***

En general los resultados se encuentran entre los rangos arcillosos – arenosos, con la diferencia de que con el incremento de  $C_p\%$  los relaves tienen un comportamiento mayormente dilatante (Figura 27). Los relaves pulpa, espesado y pasta presentan un comportamiento predominante contractivo y suelo tipo CCS, CC y CD (Tabla 4) según el  $I_B$  (Robertson P. K., 2016), presentan algunos valores dentro de la zona dilatante debido a que el suelo se vuelve más compacto con la profundidad y el tiempo de depositación. Los relaves filtrados presentan un comportamiento mayormente dilatante y con suelos del tipo TC, TD, SC y SD según el  $I_B$  (Robertson P. K., 2016).

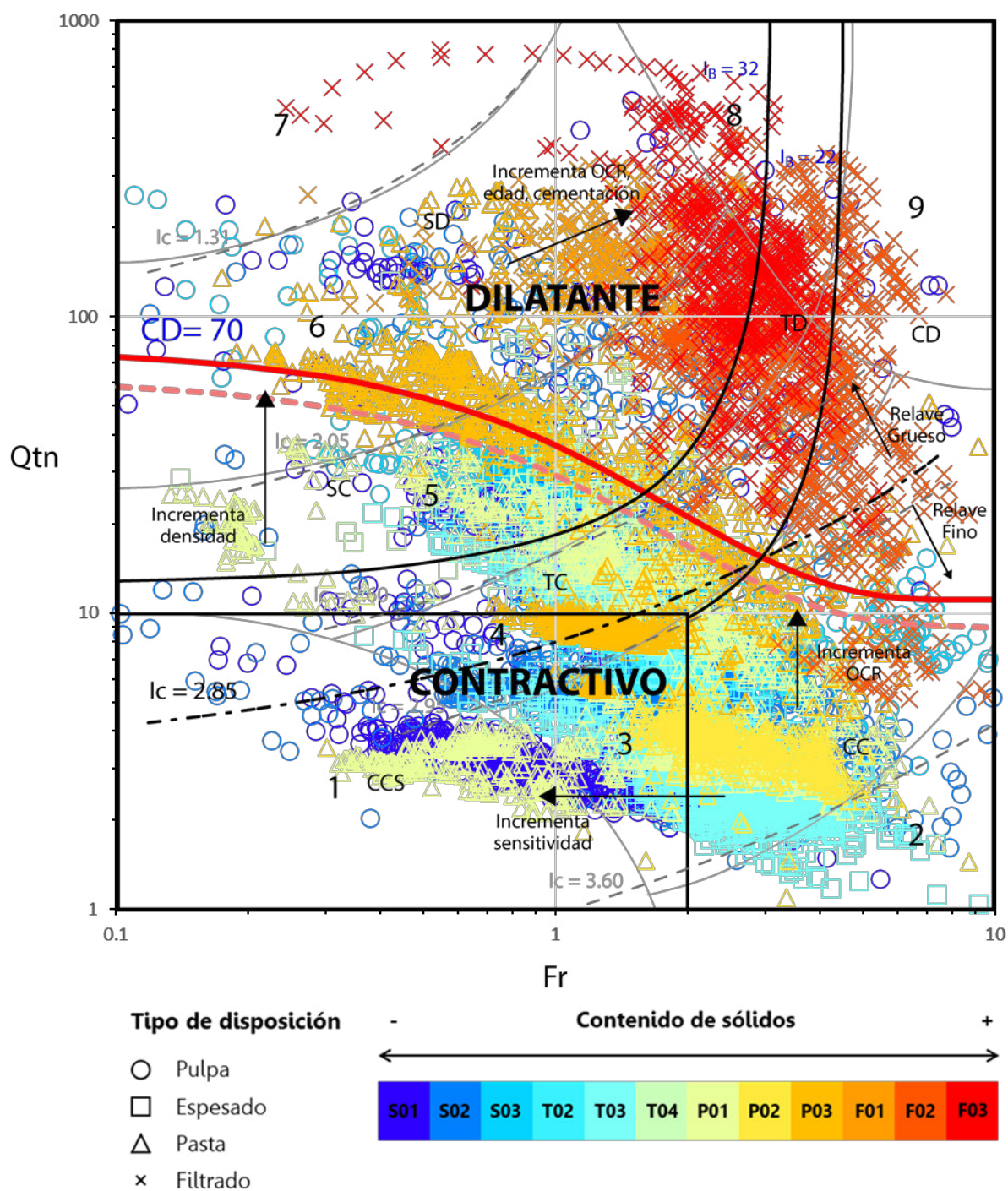


Figura 27. Distribución de los valores de  $Q_m$  y  $F_r$  para los tipos de relaves por  $C_p\%$  en el diagrama SBTn según el  $I_c$  (líneas grises) e  $I_b$  (línea negra). Los colores representan al  $C_p\%$  de la Tabla 8 y la línea discontinua negra representa el límite del umbral  $I_c=2.85$ .

### **5.2.2. Diagrama de barras 100% apiladas para el $\psi$**

De la Figura 28 y Tabla 16, los resultados del  $\psi$  se encuentran tanto en la zona contractiva como dilatante, 75 y 25% respectivamente, de un total de 9499 datos. El 75% que representa la cantidad de los datos con comportamiento contractivo, se encuentra mayormente distribuido entre los relaves tipo pulpa (2623), espesado (2293) y pasta (2426), donde los filtrados tienen una frecuencia menor (46). El 25% que representa la cantidad de los datos con comportamiento dilatante, está mayormente distribuido en los relaves filtrados (1822) y en menor cantidad en los relaves pulpa (283), espesado (27) y pasta (262).

De la Figura 28, la zona dilatante predomina estadísticamente en el relave filtrado compactado, variando entre 34 – 92%. Cuando los intervalos del  $\psi$  son menores a -0.20 y están dentro de [-0.20;-0.15], estadísticamente el relave filtrado compactado supera el 90%, la frecuencia acumulada % de sus datos cuando  $\psi < -0.10$  tiene una variación mínima; sin embargo mientras se acerca al límite contractivo – dilatante la frecuencia acumulada % va disminuyendo, llegando a un 34%. Cuando se encuentra en la zona contractiva, específicamente cuando el  $\psi$  se encuentra entre [-0.05;0.00] el valor de su frecuencia acumulada % es inferior al 5%, y cuando el  $\psi > 0.00$  la frecuencia acumulada % es nula.

Para los relaves pulpa, espesado y pasta, los valores del  $\psi$  se encuentran en la zona dilatante y contractiva (Figura 28). Para el relave pulpa la frecuencia de sus valores se encuentra cuando  $\psi < -0.20$  que al comparar su frecuencia apilada % en ese intervalo no es significativa (5%). Conforme se va acercando al límite contractivo – dilatante la frecuencia de sus valores va aumentando. Dentro de la zona contractiva la mayor frecuencia se dio cuando el  $\psi$  se encuentra en el intervalo [0.00;0.05] representando el 35% respecto al total en ese intervalo.

Para el relave espesado la frecuencia de sus valores se encuentra cuando  $\psi$  [-0.15;-0.10], su frecuencia apilada % en ese intervalo equivale al 0.005%, por lo tanto no es significativa. Y de

la misma forma que en el caso del pulpa la frecuencia de sus valores aumente cuando se va acerca al límite contractivo – dilatante. Dentro de la zona contractiva la mayor frecuencia se dio cuando  $\psi > 0.05$ , representando el 46% respecto al total en ese intervalo.

En el caso del relave en pasta la frecuencia de sus valores se encuentra cuando  $\psi < -0.20$ , como en los relaves pulpa. La frecuencia apilada % en ese intervalo equivale al 3%, por lo tanto no es significativo. De la misma forma como en los relaves pulpa y espesado, la frecuencia de sus valores aumente cuando se va acercando al límite contractivo – dilatante. Estos relaves dentro de la zona contractiva la mayor frecuencia de su  $\psi$  se encuentra en el intervalo  $[0.00;0.05]$  representando el 38% siendo muy cercano al 35% que pertenece a los relaves pulpa.

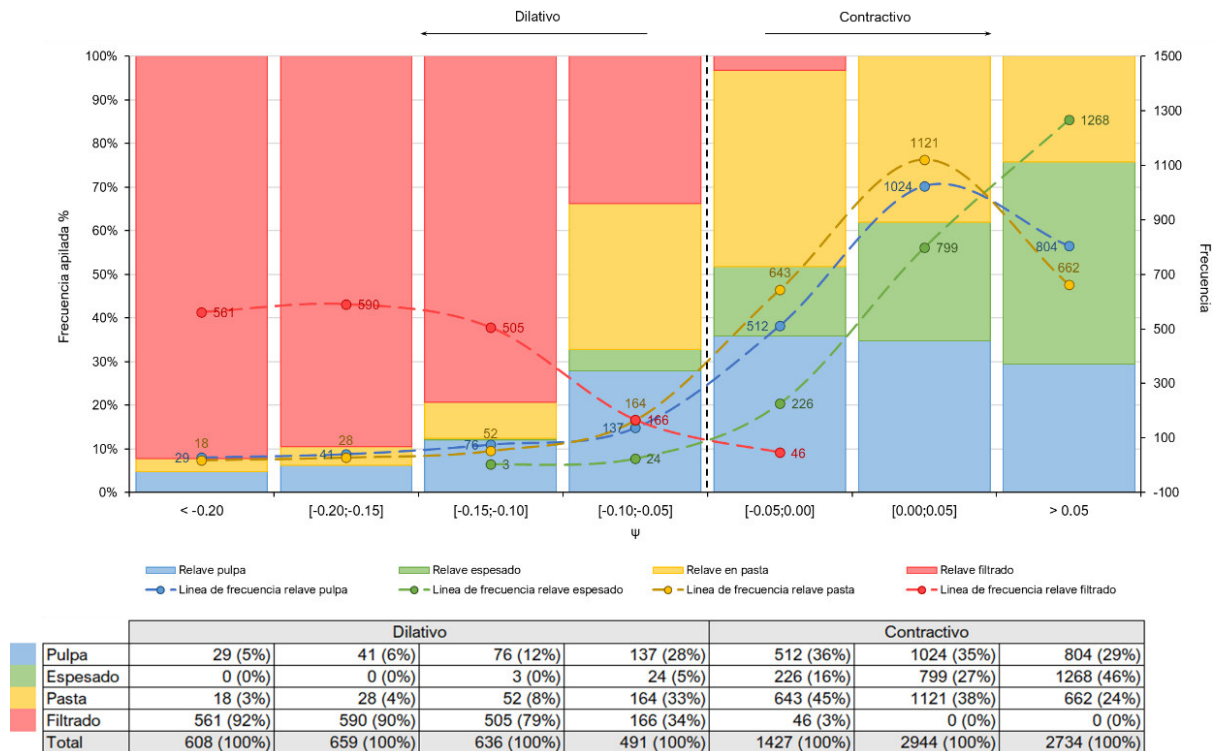


Figura 28. Diagrama de barras 100 % apiladas con la frecuencia % apilada en el eje vertical principal y el conteo de la frecuencia, con líneas del color que representa al tipo de relave por  $C_p\%$ , y en el eje vertical secundario la frecuencia para cada intervalo del  $\psi$ . El límite contractivo – dilatante ( $\psi = -0.05 \pm 0.02$ ) se encuentra como una línea discontinua de color negro.

| $\psi = -0.05 \pm 0.02$ | Pulpa | Espesado | Pasta | Filtrado | Total | %    |
|-------------------------|-------|----------|-------|----------|-------|------|
| Dilatante               | 283   | 27       | 262   | 1822     | 2394  | 25%  |
| Contractivo             | 2340  | 2293     | 2426  | 46       | 7105  | 75%  |
| Total                   | 2623  | 2320     | 2688  | 1868     | 9499  | 100% |

Tabla 16. Frecuencia de los datos totales clasificados según el límite contractivo – dilatante ( $\psi = -0.05 \pm 0.02$ ) para los tipos de relave según  $C_p\%$ .

### 5.3. Resultados del tercer análisis

Se compararon los resultados de los parámetros  $Q_m$ ,  $F_r$  y  $\psi$  de los relaves pulpa, espesado, pasta y filtrado compactado con los casos históricos de fallamiento por licuefacción estática dentro de la playa de relaves, muestras representativas de relaves arenosos, Brumadinho, Cadia y un archivo de la base de datos del proyecto CONCYTEC N°00000507, para evaluar si los relaves pulpa, espesado, pasta y filtrado compactado presentan valores similares a los casos recopilados de las referencias bibliográficas.

Es importante estimar la susceptibilidad a la licuefacción estática, por ello se debió calcular el  $\psi$ . En la Tabla 17 se muestran el  $Q_m$ ,  $F_r$ ,  $I_c$ ,  $Q_{m,cs}$  y  $\psi$ . Para hallar el valor del calculado a partir de los valores de la media y mediana del  $Q_m$  y  $F_r$ ,

#### ***5.3.1. Resultados de la comparación de los valores de $Q_m$ y $F_r$ con casos históricos y representativos***

En la Figura 29 se observa que los casos por licuefacción (A hasta F) representados con una estrella blanca se encuentran dentro de la zona contractiva y se ve un descenso en su parámetro de resistencia ( $Q_m$ ) y un incremento del  $F_r$ , sugiriendo la presencia de material fino, como sucede con el punto A, corroborado con su valor promedio de  $I_c = 3.3$  siendo mayor al umbral 2.85, clasificándolos según su valor promedio como relaves finos, también se observa el aumento de la sensibilidad especialmente en el punto F cercano a los suelos tipo 1 y con un  $I_c$  promedio de 3.0 (relaves finos). Los otros casos (B, C, D y E) en base a su  $I_c$  promedio y ubicación de  $Q_m$  y  $F_r$ , podemos clasificarlos como relaves gruesos, sin embargo, esto no significa que presenten mejores propiedades en cuanto a permeabilidad, ya que se encuentran como suelos tipos 4 a 5; es decir, con muy bajo a bajo grado relativo de permeabilidad con propiedades de drenaje imperceptibles a pobre.

Los casos representativos (estrella amarilla) corresponden a suelos tipo 5 y 6 es decir suelos arenosos mixtos a limpios, pero dentro de la zona contractiva, en este caso al pertenecer a este tipo de suelos el  $Q_m$  será más alto y el  $F_r$  bajo, sin embargo, presentan un comportamiento similar a los casos de licuefacción. Los datos de Brumadinho (K) y los datos confidenciales de ConeTec (L) tienen una distribución muy semejante en términos de  $Q_m$  y  $F_r$ , verificado con los valores de mediana de la Tabla 17, resaltado en el gráfico SBTn del 2016. En el caso de Cadia no fue posible obtener los valores promedios o de mediana de  $Q_m$  y  $F_r$ , sin embargo, sus resultados reflejan un comportamiento de suelos tipo 1 a 4, mayor sensibilidad y presencia de material fino.

| No. | $Q_m$ | $F_r$ | $I_c$ | $Q_{m,cs}$ | $\psi^*$    | Referencia                                |
|-----|-------|-------|-------|------------|-------------|-------------------------------------------|
| A   | 5.0   | 3.5   | 3.3   | 76         | -0.01       | Number 15 (Robertson P. K., 2010)         |
| B   | 40.0  | 0.4   | 2.0   | 52         | -0.01       | Number 19, 20, 21 (Robertson P. K., 2010) |
| C   | 15.0  | 1.5   | 2.6   | 56         | -0.02       | Number 27 (Robertson P. K., 2010)         |
| D   | 30.0  | 0.8   | 2.2   | 48         | -0.02       | Number 34 (Robertson P. K., 2010)         |
| E   | 15.0  | 1.0   | 2.6   | 56         | 0.00        | Number 35 (Robertson P. K., 2010)         |
| F   | 6.0   | 1.0   | 3.0   | 53         | -0.02       | Number 36 (Robertson P. K., 2010)         |
| G   | 30.0  | 0.7   | 2.3   | 53         | -0.01       | Number 3 (Robertson P. K., 2016)          |
| H   | 40.0  | 0.3   | 2.0   | 52         | -0.01       | Number 4 (Robertson P. K., 2016)          |
| I   | 45.0  | 0.4   | 2.0   | 58         | -0.02       | Number 5 (Robertson P. K., 2016)          |
| J   | 35.0  | 0.7   | 2.2   | 56         | -0.02       | Number 11 (Robertson P. K., 2016)         |
| K** | 19.5* | 1.3*  | 2.6*  | 57*        | -0.02       | Brumadinho: CPTU-16-03N-R1                |
| L** | 18.7* | 0.9*  | 2.5*  | 50*        | 0.00        | ConeTec (archivos confidenciales)         |
| M** | -     | -     | -     | -          | 0.08 – 0.10 | Cadia: CPT-N04                            |

Tabla 17. Seis casos históricos de fallas de licuefacción por flujo (A-F), 4 ejemplos de arenas de relaves (G-J), el punto CPTU-16-03N-R1 de Brumadinho (K), el CPT-N04 en Cadia (M) y un ensayo CPTu de la base de datos de ConeTec (L). (\*): Valores calculados, (\*\*): Valor de mediana.

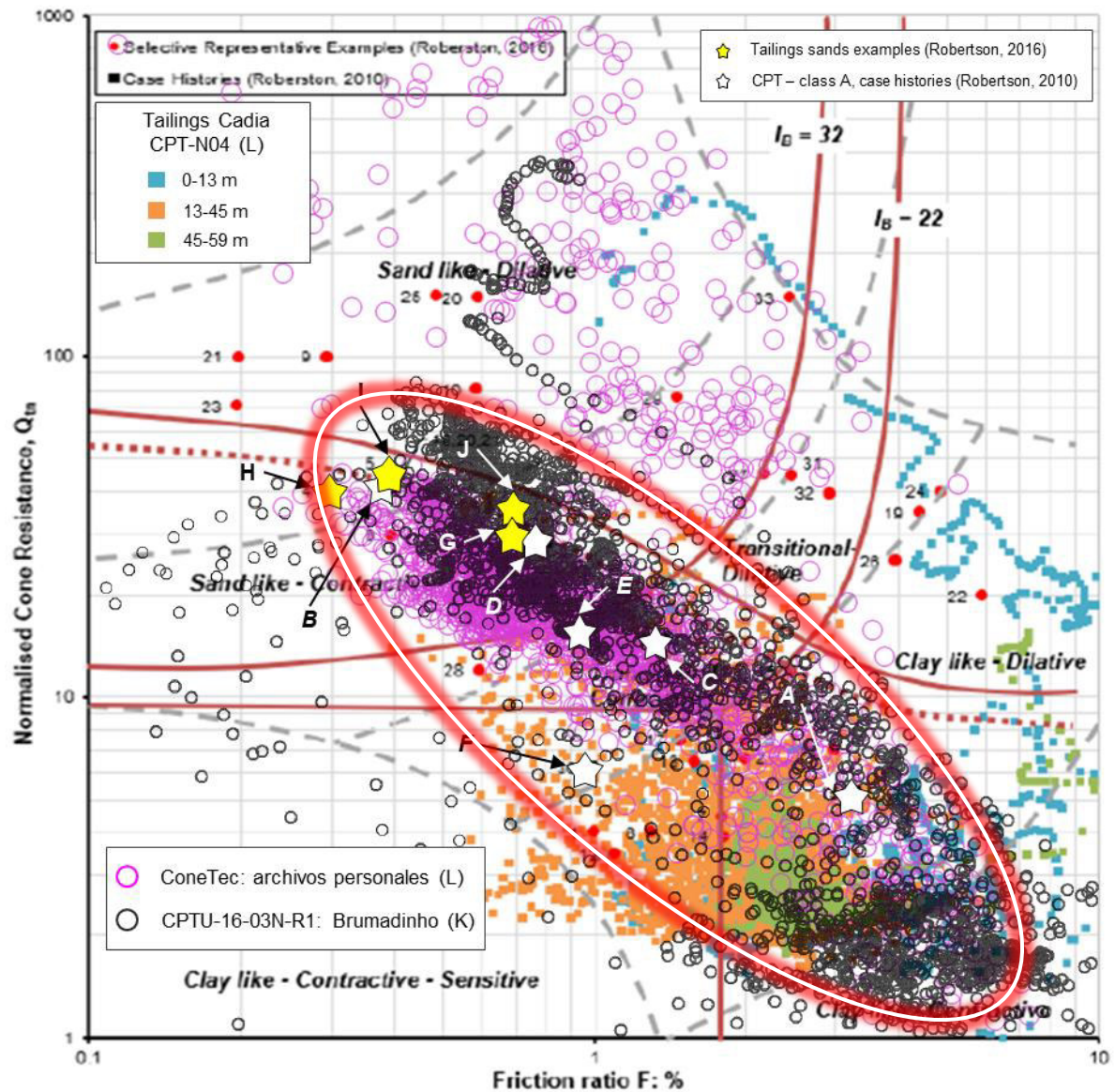


Figura 29. Gráfico SBTn basado en  $Q_{tn}$ - $F_r$  de CPT-N04 en Cadia con los casos históricos de fallas por licuefacción de flujo (estrellas blancas), ejemplos de arenas de relaves (estrellas amarillas), el CPTU-16-03N-R1 en Brumadinho (círculos negros) y datos de un ensayo CPTu de la base de datos de ConeTec (círculos fucsia).

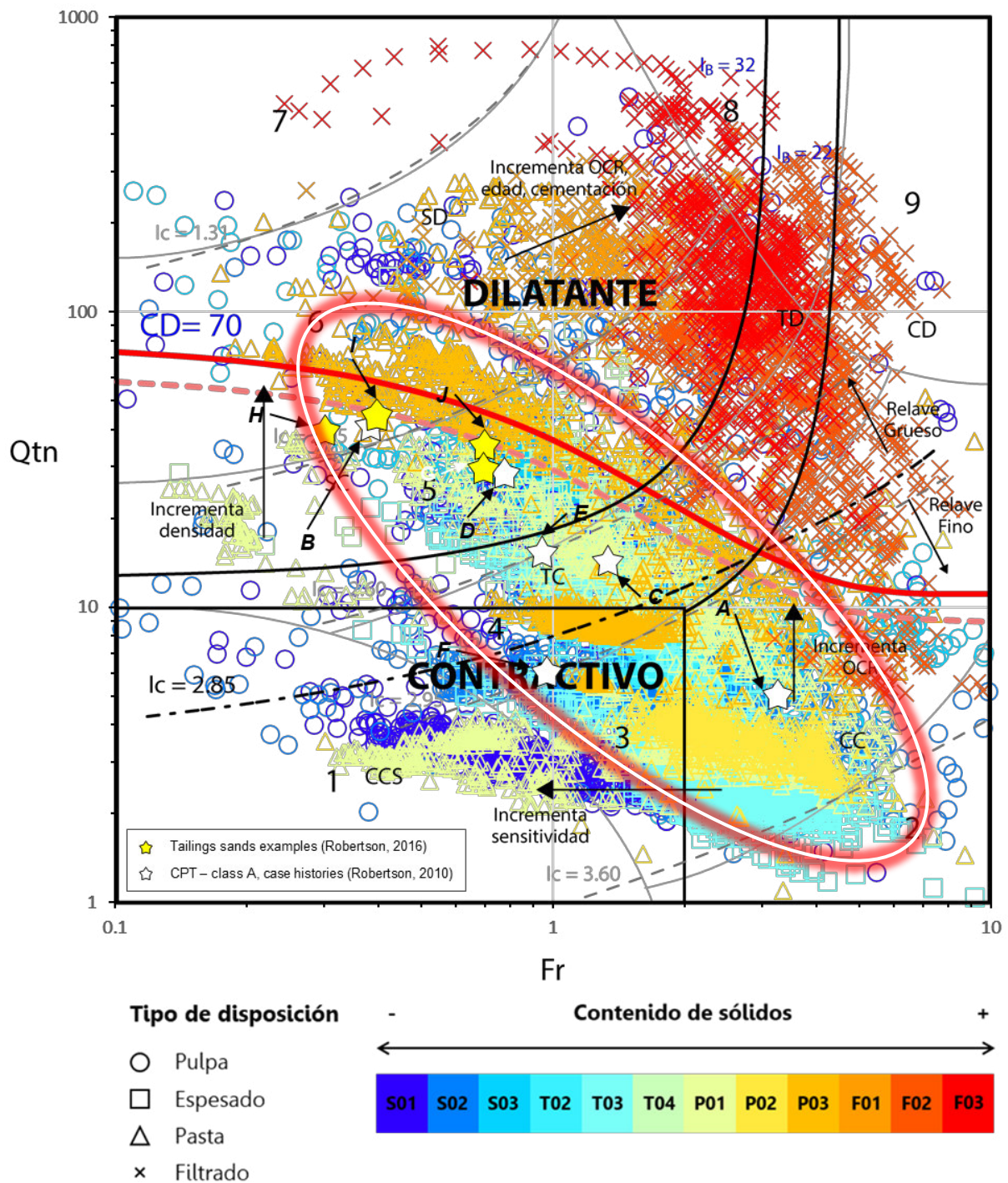


Figura 30. Distribución de los valores de  $Q_m$  y  $F_r$  para los tipos de relaves por  $C_p\%$  y ubicación de los valores de la Tabla 7 para los casos históricos y representativos en el diagrama SBTn.

En la Figura 30 se incorporó la elipse que engloba la distribución de la Figura 29 evidenciando que existe una coincidencia en la distribución de los valores de  $Q_m$  y  $F_r$  de los relaves pulpa, espesado y pasta con los casos históricos y representativos, así como los valores promedio proyectados; vale decir, estos relaves presentan un comportamiento contractivo similar o dentro de la zona de los casos históricos y tipos de suelos.

### ***5.3.2. Resultados de la comparación de los valores del $\psi$ con casos históricos y representativos***

De acuerdo con los resultados de la comparación en el SBTn, se concluyó que el comportamiento predominante es el contractivo donde la sensibilidad a causa de la presión intersticial aumentaba, esto es contrastado con el valor de su  $\psi$  de la Tabla 10, donde todos los resultados están dentro de la zona contractiva con un mayor agrupamiento en el intervalo  $[-0.05; 0.00]$  y en Cadia (según reporte técnico) cuando el  $\psi$  es mayor a 0.05, 0.08 – 0.10 (Figura 31).

Los relaves pulpa y pasta en la Figura 31, indican una mayor frecuencia de su  $\psi$  en el intervalo  $[0.00; 0.05]$  muy cercano al intervalo donde se encuentra la mayor agrupación de los casos por licuefacción y muestras representativas. En cuanto al caso de Cadia se ubica dentro de la mayor frecuencia en los relaves espesados.

Los relaves filtrados compactados su mayor frecuencia en el intervalo  $[-0.20; -0.15]$  se encuentra alejada de la mayor agrupación de los casos por licuefacción y muestras representativas así como el de Cadia, indicando un comportamiento predominantemente dilatante, por lo que tendrá una mejor capacidad de soportar estructuras y brindará estabilidad.

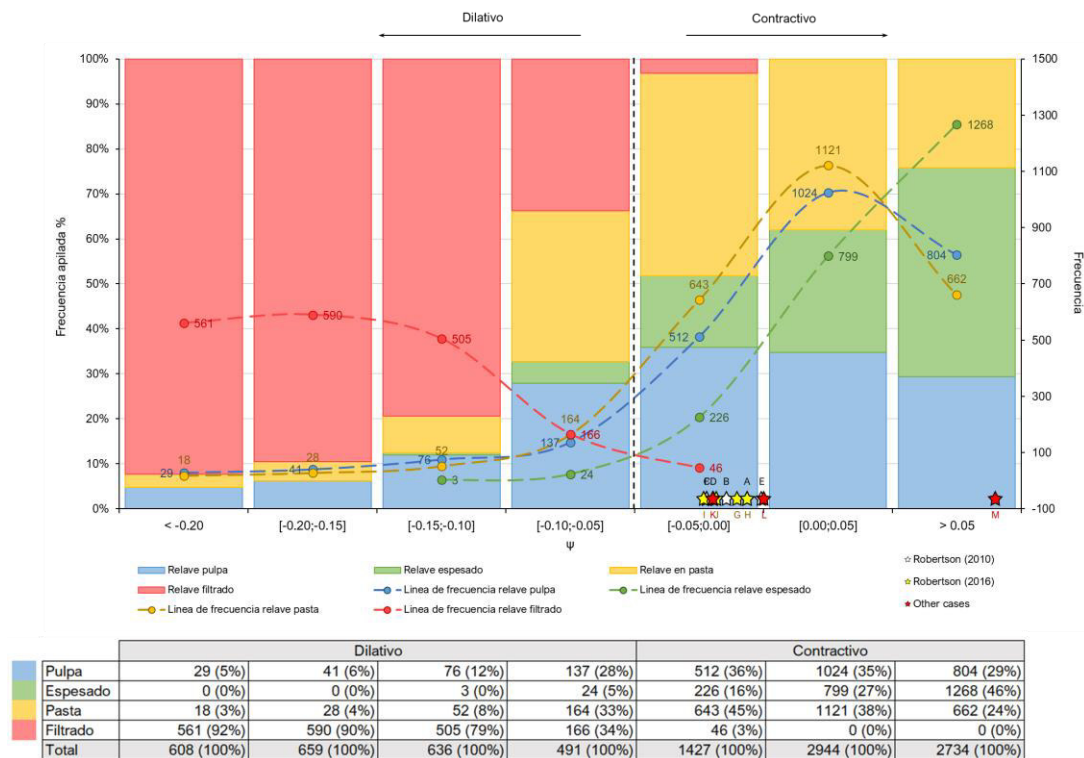


Figura 31. Gráfico de barras apiladas al 100% con la frecuencia porcentual apilada para cada intervalo del  $\psi$  y los casos de la Tabla 10 representados como estrellas. El límite de contracción-dilatación ( $\psi = -0.5 \pm 0.02$ ) se muestra como una línea negra discontinua.

## Capítulo VI. Discusión

Los diagramas SBTn de Robertson y el  $I_c = 2.85$ , el análisis geotécnico determinó que los relaves filtrados compactados presentan valores de  $Q_m$  y  $F_r$  elevados, contienen una menor proporción de relaves “finos” y muestran un comportamiento dilatante en comparación con los relaves pulpa, espesado y pasta que presentan un comportamiento más contractivo, tanto con el diagrama SBTn del 2016 y el  $\psi$ , así como una mayor cantidad de relaves “finos”.

Las herramientas estadísticas como la prueba de normalidad permitieron inferir que a pesar de la eliminación de outliers o transformación de datos, los valores de  $Q_m$  y  $F_r$  presentan una distribución no normal y se debe considerar la mediana en vez de la media como la principal medida de tendencia central como trabajó Robertson P. K., en el 2010, pues no se presentó una variación significativa para todos los tipos de relaves e incluso cuando se clasificaron los relaves en base al  $I_c$ .

En términos estadísticos, los relaves que tienen un valor  $C_p$  del 70% o inferior a este, muestran una variación mínima en  $Q_m$  y  $F_r$ , lo que sugiere un comportamiento mecánico similar dentro de la playa de relaves entre el relave pulpa, espesado y en pasta, con la excepción de los relaves filtrados compactados. El relave filtrado mayormente son relaves pertenecientes a suelos del tipo 6, 7, 8 y 9, son gruesos según el  $I_c$  y con comportamiento dilatante-arenoso.

Los relaves son clasificados según el  $I_c = 2.85$  como relaves finos ( $I_c > 2.85$ ), son suelos con comportamiento tipo 1, 2, 3 hasta 4 (Robertson P. K., 2010), tienen un grado de permeabilidad muy bajo a impermeable con un drenaje prácticamente imperceptible a impermeables de y contractivo-arcilloso (Robertson P. K., 2016), mayormente presentes en relaves pulpa, espesado y pasta. Sin embargo tenemos relaves con grado de permeabilidad muy bajo a impermeable pero son clasificados como relaves gruesos ( $I_c < 2.85$ ) con un comportamiento de suelos tipo 8 y 9 densificado-rígido/dilatante-arenoso, asimismo relaves con grado de

permeabilidad bajo a alto clasificados como relaves gruesos con comportamiento de suelos 4, 5, 6 y 7 dilatante-contractivo-arenoso.

La influencia o el riesgo que presenten los valores de  $Q_m$  y  $F_r$  dependerá de la ubicación de los relaves en el embalse, pueden presentar un problema de estabilidad si estos se encuentran más cerca del dique.

Los casos históricos y representativos se agrupan en un intervalo de -0.05 a 0.00 para el  $\psi$ , excepto Cadia que presenta valor superior a 0.05, coincidiendo con los resultados de los relaves pulpa y pasta presentan una mayor frecuencia del  $\psi$  cuando está en un rango de 0.00 a 0.05, espesados cuando son valores superiores a 0.05 y los filtrados compactados en un rango de -0.20 a -0.15, lo que podría indicar que los relaves pulpa y pasta presentarían un mayor potencial de licuefacción basándose en los casos estudiados anteriormente en el estado del arte.

Los suelos 6 y 7 son los que presentan un grado relativo de permeabilidad alto con un buen drenaje. Los suelos 1 hasta el 5 presentan un grado relativo de permeabilidad muy bajo o casi imperceptible hasta moderado, al igual que los suelos 8 y 9, siendo la diferencia en la presencia de sensibilidad.

Los relaves pulpa, espesado y pasta estadísticamente indican mayor presencia de relaves finos tomando el umbral de  $I_c=2.85$ , y en los relaves filtrados compactados casi en su totalidad presentan relaves gruesos. También, podrían presentar un mayor riesgo de fallamiento por licuefacción determinado a partir del  $\psi$  por la mayor frecuencia de sus valores dentro de la zona contractiva en intervalos de 0.00 a 0.05 o mayor a 0.05. Los relaves filtrados compactados al estar dentro de la zona contractiva, se reduce la sensibilidad (menor presión intersticial) y posee mayores valores de resistencia.

Si bien la licuefacción estática puede darse en suelos arenosos o sueltos, se observó que también están presentes cuando hay un contenido de finos muy considerable, sin embargo, estos deben cumplir la característica de tener comportamiento contractivo.

## **Capítulo VII. Conclusiones**

La concentración de sólidos influye en las playas de relaves cuando presentan mayor presión de agua intersticial o al ser deshidratados/compactados, cuando presentan relaves finos o gruesos, así como en la estimación de la susceptibilidad a la licuefacción estática utilizando el parámetro  $\psi$ .

Los relaves pulpa, espesado y pasta presentan valores de  $Q_m$  y  $F_r$  similares, mayor presencia de presión agua intersticial, comportamiento contractivo y mayor proporción de relaves finos otorgándoles condiciones de no drenadas.

Los relaves filtrados compactados cuentan con altos valores de  $Q_m$  y  $F_r$ , menor presión de agua intersticial, comportamiento dilatante y mayor presencia de relaves gruesos, como arena y grava, lo que les confiere una mayor capacidad de drenaje y estabilidad.

Los métodos estadísticos utilizados fueron básicos pero eficaces para analizar de forma global y rápida los resultados permitiendo deducir el comportamiento de los relaves mediante la comparación con los casos obtenidos de las referencias bibliográficas para brindar un respaldo a la investigación realizada.

Debido a la presencia de outliers y para obtener mayor equilibrio y representatividad en los datos, se encontró que la mediana fue la medida de tendencia central más adecuada para los relaves dentro de la playa de relaves y brindar una descripción del comportamiento de los relaves en la playa.

Los relaves pulpa, espesado y pasta presentan valores  $Q_m$ ,  $F_r$  y  $\psi$  muy cercanos a los casos de fallamiento por licuefacción estática recopilados por Robertson P. K. (2010) y a las muestras

representativas de relaves recopilados por Robertson P. K. (2016), sugiriendo que pueden presentar un riesgo potencial de licuefacción.

Los relaves filtrados compactados ofrecen mejores condiciones para prevenir el fallamiento debido a la licuefacción estática gracias a su naturaleza dilatante, capacidad de drenaje y mayor resistencia. Estas características contribuyen a una mayor estabilidad y reducen el riesgo de licuefacción, lo que hace que los relaves filtrados compactados sean una opción más segura en comparación con otros tipos de relaves.

### **Capítulo VIII. Recomendaciones**

Al comparar el porcentaje de outliers eliminados se deduce que estos no ejercen un impacto significativo en los resultados. Sin embargo, es importante tener cuidado al momento de eliminar estos valores atípicos, ya que al hacerlo puede conllevar la pérdida de información importante y dar lugar potencialmente a interpretaciones erróneas de los resultados.

Las propiedades y comportamientos de los relaves están influenciados por su concentración de sólidos, presión de agua intersticial, proporción de partículas finas y gruesas, y capacidad de drenaje. Es esencial considerar estas características al analizar y gestionar los relaves, ya que tienen implicaciones importantes para su estabilidad, seguridad y posible impacto ambiental, tal y como sucede en algunas presas de relaves que utilizan la disposición tipo pasta.

## Capítulo IX. Referencias Bibliográficas

- Alfaro, D. C., & Mora, F. A. (2014). *Modelo físico para la medición de la permeabilidad en suelos cohesivos (cabeza variable)*. Tesis de titulación, Universidad Católica de Colombia, Facultad de ingeniería, Bogotá.  
<https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/56245b97-4aa1-41ae-995d-09cb90e1825f/content>
- Alfaro, M. A. (2000). *Estadística*.  
[https://www.academia.edu/13846038/ESTADISTICA\\_Marco\\_Alfaro](https://www.academia.edu/13846038/ESTADISTICA_Marco_Alfaro)
- Alperin, M. (2013). *Introducción al análisis estadístico de datos geológicos* (Primera ed.). Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP).  
<https://doi.org/10.35537/10915/34221>
- Arroyo, M., & Gens, A. (2021). *Computational analyses of Dam I failure at the Corrego de Feijao mine in Brumadinho Final Report*. CIMNE.  
[https://www.researchgate.net/publication/360424114\\_Computational\\_Analyses\\_of\\_Dam\\_I\\_Failure\\_at\\_the\\_Corrego\\_de\\_Feijao\\_Mine\\_in\\_Brumadinho\\_Final\\_Report\\_for\\_VALE\\_SA\\_August\\_2021](https://www.researchgate.net/publication/360424114_Computational_Analyses_of_Dam_I_Failure_at_the_Corrego_de_Feijao_Mine_in_Brumadinho_Final_Report_for_VALE_SA_August_2021)
- ASTM D5778-20. (2020). *Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils*. <https://doi.org/https://qdoc.tips/astm-d5778-12-pdf-free.html>
- Burdano, D. A. (2021). *Ground improvement for tailing dam remediation and design*. Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona Tech, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Barcelona.  
[https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/359941/TMF\\_Burbano%20B%20Daniel.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/359941/TMF_Burbano%20B%20Daniel.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Cacciuttolo, C., & Marinovic, A. (2022). Sustainable Management of Thickened Tailings in Chile and Peru: A Review of Practical Experience and Socio-Environmental Acceptance. *Sustainable*, 14, 16:67. <https://doi.org/10.3390/su141710901>
- Cacciuttolo, C., & Pérez, G. (2022). Practical Experience of Filtered Tailings Technology in Chile and Peru: An Environmentally Friendly Solution. *Minerals*, 12, 889. <https://doi.org/10.3390/min12070889>
- Davis, J. C. (2002). *Statistics and data analysis in Geology* (Third ed.). John Wiley & Sons. <https://pdfcoffee.com/statistics-and-data-analysis-in-geology-3rded-5-pdf-free.html>
- Díaz, G. (2011). *Caracterización de un sitio mediante ensayo de CPTu*. Tesis de maestría, Pontifica Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Bogotá D.C. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/1469/DiazTrillosGonzalo2011.pdf>
- EBA Engineering Consultants Ltd. (2007). Geotechnical Design Report "Dry" stack Tailings Storage Facility Minto Mine, Yukon. En *Minto Mine – Tailings Management Plan* (pág. 118). [https://emrlibrary.gov.yk.ca/minerals/MajorMines/minto/minto\\_mine\\_tailings\\_management\\_plan\\_final\\_2007.pdf](https://emrlibrary.gov.yk.ca/minerals/MajorMines/minto/minto_mine_tailings_management_plan_final_2007.pdf)
- Euroinnova International Online Education. (s.f.). *Para que sirven las medidas de tendencia central*. Retrieved 26 de enero de 2023, from Euroinnova: <https://www.euroinnova.pe/blog/para-que-sirven-las-medidas-de-tendencia-central>
- Experto GestioPolis.com. (22 de junio de 2020). *Estadística: qué es, definición, significado, objetivos, tipos, partes, elementos, historia, ejemplos*. GestionPolis: <https://www.gestiopolis.com/que-es-estadistica-tipos-y-objetivos/>
- Fabian, K., Jacobs, M., Hooshier, A., & Ngwenya, E. (2015). The impacts of using thickened tailings on water management and CAPEX of tailings storage facilities. En *Paste 2015*:

- Proceedings of the 18th International Seminar on Paste and Thickened Tailings* (págs. 535-546). [https://doi.org/10.36487/ACG\\_rep/1504\\_41\\_Fabian](https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1504_41_Fabian)
- Fornieles, A. (2013). Transformaciones de datos en la elaboración de estudios salariales. *Journal of Work and Organizational Psychology*, 29, 75-82. <https://doi.org/10.5093/tr2013a11>
- Freeport - McMoran Sierrita INC. (2008). Appendix A: Technical Memorandum for sulfate source control evaluation. In *TECHNICAL MEMORANDUM FOR* (p. 65). MWH. [https://fcx.com/sites/fcx/files/documents/sierrita/2008/20081023\\_001\\_Appendix\\_A.pdf](https://fcx.com/sites/fcx/files/documents/sierrita/2008/20081023_001_Appendix_A.pdf)
- Gidahatari Agua. (20 de agosto de 2012). *slideshare*. <https://es.slideshare.net/gidahatari/gestion-de-relaves-mineros>
- (2017). *IR-T08 Amendment Notice (Major)*. Government of Western Australia, Department of Water and Environmental Regulation. [https://www.der.wa.gov.au/images/documents/our-work/licences-and-works-approvals/Amendment\\_notices/L6869-1992-12a.pdf](https://www.der.wa.gov.au/images/documents/our-work/licences-and-works-approvals/Amendment_notices/L6869-1992-12a.pdf)
- Jaime, A., & Sanabria, J. (2018). Aspectos geotécnicos en operaciones Mineras. *XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*, 11. <https://www.researchgate.net/publication/352488018>
- Jefferies, M., & Been, K. (2015). *Soil Liquefaction, A Critical State Approach* (Second ed.). London: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b19114>
- Jefferies, M., Morgenstern, N., Zyl, D., & J., W. (2019). *Report on NTSF Embankment Failure*. Ashurst Australia: Cadia Valley Operations.
- K2fly. (2021). *A chronology of major tailings dam failures*. <https://go.k2fly.com/tailings-failures-guide>

- Klohn Crippen Berger. (2017). *Study of Tailings Management Technologies, MEND Report 2.50.1*. [http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2.50.1Tailings\\_Management\\_TechnologiesL.pdf](http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2.50.1Tailings_Management_TechnologiesL.pdf)
- Ley N° 31211. Ley que dispone la adecuación del transporte y disposición final de relave a empresas que realizan actividades minero - metalúrgicas. (08 de Junio de 2021). *El Peruano*, págs. 3-4. <https://busquedas.elperuano.pe/download/url/ley-que-dispone-la-adecuacion-del-transporte-y-disposicion-f-ley-n-31211-1960901-2>
- Mayne, P. W., Styler, M., Woeller, D. J., & Sharp, J. T. (2017). Identifying contractive soils by CPT material index for flow liquefaction concerns. *GeoOttawa 2017 - Annual Canadian Geotechnical Conference*. Ottawa. [https://www.researchgate.net/publication/337604431\\_Identifying\\_contractive\\_soils\\_by\\_CPT\\_material\\_index\\_for\\_flow\\_liquefaction\\_concerns](https://www.researchgate.net/publication/337604431_Identifying_contractive_soils_by_CPT_material_index_for_flow_liquefaction_concerns)
- Morales, C., Castillo, E., & Posch, J. P. (2021). Geotechnical characterization of an old copper tailings impoundment by using the Cone Penetration Test and Laboratory Testing. *7th International Conference on Tailings Management*. Tailings 2021. [https://www.researchgate.net/publication/354153569\\_Geotechnical\\_characterization\\_of\\_an\\_old\\_copper\\_tailings\\_impoundment\\_by\\_using\\_the\\_Cone\\_Penetration\\_Test\\_and\\_Laboratory\\_Testing](https://www.researchgate.net/publication/354153569_Geotechnical_characterization_of_an_old_copper_tailings_impoundment_by_using_the_Cone_Penetration_Test_and_Laboratory_Testing)
- Myra Falls Mine Ltd. (2021). *Myra Falls Five-Year Reclamation Plan Years 2021 to 2025 and Conceptual Closure Plan*. <https://crecwebcom.files.wordpress.com/2022/03/2021-myra-falls-mine-5-year-mine-and-reclamation-plan.pdf>
- Oldecop, L., & Rodríguez, R. (2007). Mecanismos de fallas de las presas de residuos mineros. *Ingeniería Civil*(148), 9. [https://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua\\_articulo/Ingcivil/2007\\_148\\_181.pdf](https://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua_articulo/Ingcivil/2007_148_181.pdf)

- Peña, D. (2014). *Fundamentos de Estadística*. Alianza Editorial.
- Qingting, L., Zhengchao, C., Bing, Z., Baipeng, L., Kaixuan, L., Linlin, L., & Huadong, G. (2020). Detection of Tailings Dams Using High-Resolution Satellite Imagery and a Single Shot Multibox Detector in the Jing–Jin–Ji Region, China. *Remote Sens*, 12(16), 2626. <https://doi.org/10.3390/rs12162626>
- Robertson, P. K. (2010). Evaluation of Flow Liquefaction and Liquefied Strength. Using the Cone Penetration Test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136:842-853. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000286](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000286)
- Robertson, P. K. (2016). Cone penetration test (CPT)-based soil behavior type (SBT) classification system — an update. *Canadian Geotechnical Journal*, 0000, 00: 1–18. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0044>
- Robertson, P. K., & Cabal, K. L. (2015). *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering* (6th ed.). Gregg. <https://www.g-i.co.nz/wp-content/uploads/greggs-cpt-guide-6th-2015.pdf>
- Robertson, P. K., & Cabal, K. L. (2022). *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering* (7th ed.). <https://www.cpt-robertson.com/PublicationsPDF/CPT-Guide-7th-Final-SMALL.pdf>
- Robertson, P. K., De Melo, L., Williams, D. J., & Wilson, G. (2019). Appendix E – Field Investigation & Laboratory Geotechnical Data and Interpretation. In P. K. Robertson, L. De Melo, D. J. Williams, & G. W. Wilson, *Report of the Expert Panel on the Technical Causes of the Failure of Feijão Dam I* (p. 466). <https://bdrb1investigationstacc.z15.web.core.windows.net/assets/Feijao-Dam-I-Expert-Panel-Appendix-E-FieldLab-ENG.pdf>

- Shuttle, D. A., & Cunning, J. (2008). Reply to the discussion by Robertson on “Liquefaction potential of silts from CPTu”. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(1), 142-145.  
<https://doi.org/10.1139/T07-119>
- Spínola, M. (31 de julio de 2013). *Análisis Exploratorio de los Datos*. Index of /Repositorio/MGAP/MGAP-05: [https://www.ucipfg.com/Repositorio/MGAP/MGAP-05/BLOQUE-ACADEMICO/Unidad-3/Analisis\\_exploratorio\\_de\\_los\\_datos.pdf](https://www.ucipfg.com/Repositorio/MGAP/MGAP-05/BLOQUE-ACADEMICO/Unidad-3/Analisis_exploratorio_de_los_datos.pdf)
- (2014). *The Hermosa Mine Proposal: Potential Impacts to Patagonia's Water Supply*. Earthworks & Patagonia Area Resource Alliance.  
<https://www.patagoniaalliance.org/wp-content/uploads/2014/11/Report-Hermosa-Mine-Proposal.pdf>
- Vick, S. G. (1990). *Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams*. BiTech Publishers LTD.  
<https://doi.org/10.14288/1.0394902>
- Wels, C., Barnekow, U., Haase, M., Exner, M., & Jakubick, A. (2000). A case study on self-weight consolidation of uranium tailings. *Canada: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum*. <https://www.researchgate.net/publication/267219599>