



UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

**USO DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES PARA
EL MONITOREO DE HUMEDAD SUPERFICIAL EN
DEPÓSITOS DE RELAVES**

Tesis de Grado y Memoria de Título presentada por

MONSERRAT SÁNCHEZ OYARZÚN

como requisito parcial para optar al título de

Ingeniera Civil

y el grado de

Magister en Ciencias de la Ingeniería Civil

Profesor Guía

GONZALO HERNÁN SUAZO FUENTEALBA

2022

Agradecimientos

Agradezco principalmente a mi madre, Mariana Oyarzún, quien ha tenido la bondad de aguantarme estos años de universidad (y en general toda mi vida), tolerando mi mal genio y mi poco tiempo por estar preocupada de estudiar, sin percatarme de sus penas y luchas, ausentándose de momentos importantes en los que me necesitó, sin embargo, su incondicionalidad y amor ha sido infinito y sincero, sin esperar retribución, aunque se merezca más que el sol. Gracias madre por permitir que esto sea posible.

A mis hermanas, Emilly y Dhanniela, quienes me protegieron e intentaron que tuviera más de lo que era posible, tratando de evitarme muchas cosas por las que ellas tuvieron que pasar, y que, sin eso, yo no hubiera podido dedicarme a las cosas que me gustan y al estudio de la manera en lo que hice.

Gracias infinitas a mi sobrina Antonella, quien aun no tiene la consciencia para dimensionar la alegría que me generó su llegada, la cual fue oportuna en los momentos de mayor oscuridad, siendo el empujón que necesitaba para continuar.

También quiero agradecer a los amigos de mi paso por la universidad, Roberta, Cristian, Felipe, Daniel, entre tantos otros quienes hicieron la carga universitaria más llevadera. A mi amiga Paula, mi partner y pilar incondicional en todo el pregrado, quien me enseñó a tener esperanza aun cuando todo estaba perdido, logrando que creyera y lográramos cosas lindas juntas. A mi amiga Daniela, con quien sufrimos y disfrutamos de cada proceso del magister, pero que sin ella esta última etapa no hubiera sido lo mismo.

Agradecer especialmente el apoyo de mi amigo Victor Araya. Aún recuerdo el día que, en un bar, le dije que me gustaría entrar al magister, pero que no creía que era capaz de lograrlo, mientras que él no dudó ni un segundo en mi, acompañándome en todo el proceso hasta la defensa de esta tesis.

No puedo dejar afuera a mi queridísimo amigo Cristian Monje, compañero de eternas tardes en el LEMCO, con quien podíamos estar fin de semanas completos (además de la semana) conversando entre geotecnia y la vida. Te agradezco Cristian más allá de lo académico o profesional, sino por tu apoyo y contención en momentos que solo los dos compartimos y atesoramos, haciéndome sentir afortunada de tenerte en mi vida.

Finalmente, agradecer a mi profesor Gonzalo Suazo, quien me dio la oportunidad de ser su alumna sin conocerme, a quien lo hice pasar más de una rabia, pero que no me dejó sola y siguió apoyándome hasta el fin de este proceso. Gracias por haberme abierto una puerta de la cual estaré eternamente agradecida.

*A las mujeres de mi vida,
Mariana, Emily, Dhanniela y Antonella*

Resumen

Para un adecuado manejo de depósitos de relaves es necesario el monitoreo de variables que influyen en la estabilidad global de la estructura y que ayuden a la toma de decisiones tanto en la etapa de construcción como de operación y cierre de los depósitos. Una de estas variables corresponde al contenido de humedad del material el cual repercute en fenómenos de estabilidad física y química, tales como generación de drenaje ácido, licuefacción, erosión, entre otras. Del mismo modo, el contenido de humedad de relaves influye en procesos de evaporación e infiltración, los cuales dependen del grado de saturación a los que se encuentre el material, afectando por tanto la evaluación y control del balance aguas global del depósito, los cuales son previamente proyectados a partir de modelos que permiten estimarlo, por lo que llevar un control del contenido de humedad ayuda a verificar en operación el proceso.

Actualmente, no se realizan controles continuos de humedad a nivel temporal y espacial en depósito de relaves, dada las complicaciones asociadas a la toma de muestras en la zona de almacenamiento del material (cubeta), debido a las bajas densidades a las que se encuentran las pulpas, lo que dificulta el acceso a gran parte de la superficie de los depósitos. Lo anterior se suma al tiempo que toma determinar el contenido de humedad cuando se logra extraer muestras desde el depósito, principalmente, por la necesidad de ser evaluadas en laboratorio, generando la urgencia de emplear técnicas más eficientes de monitoreo.

En la última década, el surgimiento de tecnologías de procesamiento de imágenes y el uso exitoso de monitoreo de variables de interés en áreas de estudio como la hidrología, evaluando fenómenos de infiltración y evaporación (Sadeghi et al., 2017), y la agricultura, en el estudio de salud de cultivos (Hassan-Esfahani et al., 2015), ha permitido generar una herramienta de trabajo que facilita y agiliza el control de variables relevantes, lo que, a su vez, abre las puertas para su aplicación en nuevos ámbitos de investigación. Uno de ellos es el campo de residuos mineros, el cual tiene como necesidad, entre otras variables, el registro de contenido de humedad en depósitos de relaves, por lo que esta investigación estudia la aplicación de imágenes hiperespectrales para la estimación de humedad superficial de dichos depósitos, evaluando la viabilidad de aplicación a través del análisis del comportamiento de la reflexión de luz frente a los cambios del contenido de humedad en relaves.

Las investigaciones previas han estimado la humedad, por ejemplo, con el uso de espectrómetros en laboratorio (Sadeghi, Jones, & Philpot, 2015), o con cámaras hiperespectrales en terreno (Hassan-Esfahani et al., 2015), al igual que la industria de residuos petroleros donde el uso de imágenes espectrales ha permitido estimar contenidos de humedad (I. Entezari et al., 2013), entre otras variables de interés, mientras que en la minería multimetálica, a través del uso de cámaras multiespectrales en el rango VIS (400-700 nm) y NIR (700-1000 nm), ha evidenciado la viabilidad de la estimación del contenido de humedad a partir de la medición de reflexión de luz (Araya et al., 2019).

En esta investigación se presenta un procedimiento similar al utilizado por Araya, el cual estudia el monitoreo de procesos de disecación de probetas saturadas de relaves provenientes de distintos métodos de depositación, los cuales son estimulados con iluminación artificial provenientes de láseres a longitudes de onda de 405 nm hasta los 980 nm, y evaluados en rangos de contenido de finos de 0% a 100% y densidades entre 1.31 gr/cc a 1.72 gr/cc.

Además, se compara el comportamiento entre relaves y suelos naturales bajo el mismo proceso de evaluación.

Los resultados muestran una relación entre el contenido de humedad y reflexión de luz con comportamiento parabólico, lo que sumado al índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), permiten estimar el contenido de humedad superficial de las probetas, generando un método auspicioso para el monitoreo continuo de humedad en depósitos de relaves.

Abstract

For an adequate TSF management, it is necessary to monitor variables that influence the overall structure stability and help at decision-making both in the construction stage and in the operation and closure deposits. One of these variables corresponds to the moisture content, which affects at physical and chemical stability phenomena such as acid drainage, liquefaction, infiltration, erosion, among others. In the same way, tailings moisture content influences evaporation and infiltration processes, which depend of saturation degree, thus affecting the evaluation and control of the global water balance of the deposit, which are previously projected from models that allow it to be estimated, so keeping track of the moisture content helps to verify the process in operation.

Currently, continuous moisture controls are not carried out at a temporal and spatial level, due to the complications associated with taking samples in the tailings storage area, due to the low densities at which the pulps are found, which makes it difficult to access a large part of the tailings surface, a process that also takes time to determine the moisture content due to the need to be evaluated in the laboratory, generating the need to use more efficient monitoring techniques.

In the last decade, the remote sensing technologies and the successful use of monitoring interest variables in areas such as hydrology, evaluating infiltration and evaporation phenomena (Sadeghi et al., 2017), and agriculture, in the study of crop health (Hassan-Esfahani et al., 2015). It has allowed the generation of a tool that facilitates and speeds up the control of relevant variables, which, in turn, opens the doors for its application in new research fields. One of them is the mine waste area, which needs, among other variables, the monitoring of moisture content in tailings deposits. Because of that, this research studies the application of hyperspectral images for the moisture content estimation, evaluating the feasibility of application through the analysis of the behavior of light reflection against changes in moisture content in tailings.

In the research development, multispectral cameras are used in the VIS range (400-700 nm) and NIR (700-1000 nm) to monitor the dissection processes of saturated tailings specimens from different mining extraction processes, which are stimulated with artificial lighting from lasers at wavelengths from 405 nm to 980 nm, and evaluated in fine content ranges from 0% to 100% and densities between 1.31 g / cc to 1.72 g / cc. In addition, the behavior between tailings and natural soils is compared under the same evaluation process.

The results show a relationship between the moisture content and light reflection with parabolic behavior, which added to the normalized difference vegetation index (NDVI), allow estimating the surface moisture content, generating an auspicious method for monitoring. continuum of moisture in tailings deposits.

Índice General

Agradecimientos	I
Resumen	III
Abstract.....	V
Índice de Figuras	VIII
Índice de Tablas.....	X
CAPÍTULO 1: Introducción	1
CAPÍTULO 2: Objetivos	6
2.1. Objetivo general.....	6
2.2. Objetivos específicos	6
CAPÍTULO 3: Marco Teórico.....	7
3.1. Fuentes de luz	7
3.1.1 Luz natural.....	7
3.1.2 Luz artificial:	9
3.2. Fenómeno de reflexión, refracción y absorción de luz.....	10
3.3. Métodos de medición de intensidad de luz reflejada.....	13
3.3.1 Sensores activos.....	13
3.3.2 Sensores pasivos.....	14
3.4. Imágenes como almacenamiento de información.....	15
3.5. Medición de reflexión de luz para determinar variables de interés en suelos	18
3.6. Relaves.....	20
3.6.1 Deshidratación, transporte y depositación.....	20
CAPÍTULO 4: Metodología	33
4.1. Caracterización de materiales	33
4.2. Aparatos de ensayo	37
4.2.1 Cámaras multiespectrales	39
4.2.2 Computador de control	40
4.2.3 Iluminación activa	41
4.2.4 Servomotor	42
4.2.5 Software de visualización.....	42
4.3. Preparación de muestras	43

4.3.1	Tramos de humedad.....	43
4.3.2	Tramos de densidad	44
4.3.3	Variación de contenido de finos	44
4.4.	Desarrollo de ensayos	44
4.5.	Procesamiento de imágenes	45
4.6.	Plan de trabajo	46
CAPÍTULO 5: Resultados		48
5.1.	Efecto de longitud de onda	48
5.2.	Efecto de la humedad en la reflexión de luz para muestras de relave	53
5.3.	Efecto de la densidad seca	57
5.4.	Efecto del contenido de finos.....	59
5.5.	Efecto del origen del material	62
5.6.	Uso de reflexión de luz e índice NDVI para estimación de humedad	63
CAPÍTULO 6: Conclusiones		65
CAPÍTULO 7: Referencias		68
ANEXOS		72

Índice de Figuras

Fig. 3-1: Espectro de luz solar.....	7
Fig. 3-2: Funcionamiento de láser convencional.....	10
Fig. 3-3: Esquema de “Ley del cuadrado inverso”.....	10
Fig. 3-5: Esquema de “Ley del coseno de Lambert”.....	11
Fig. 3-6: Esquema de “Ley de Snell”.....	12
Fig. 3-7: Imágenes con a) 1 bit, b) 2 bits y c) 8 bits.....	15
Fig. 3-8: Numeración de bandas RGB para la formación de un color particular.....	16
Fig. 3-9: Esquema de cantidad de bandas por tipo de imagen; RGB(red, green, blue), MSI(imagen multiespectral), HSI(imagen hiperespectral).....	17
Fig. 3-10: Esquema de espesador.....	22
Fig. 3-11: Esquema de Filtrador.....	23
Fig. 3-12: A la izquierda el sistema de bombas, a la derecha la tubería que transporta el relave.	24
Fig. 3-13: Cinta transportadora de relaves filtrados.....	24
Fig. 3-14: A la izquierda, la tubería de depositación, a la derecha, la salida de tubería desde el grifo.....	26
Fig. 3-15: Esquema de operación de ciclón.....	26
Fig. 3-16: Descarga de relave en método Paddock.....	27
Fig. 3-17: Tranque de relaves El Torito.....	28
Fig. 3-18: Métodos constructivos en tranques de relaves.....	28
Fig. 3-19: Embalse de relaves “Caren”.....	29
Fig. 3-20: Depósito de relaves espesados “Esperanza”.....	29
Fig. 3-21: Depósito de relaves en pasta “Delta”.....	30
Fig. 3-22: Depósito de relaves filtrado “Rahco”.....	30
Fig. 4-1: Muestras de relave y suelo limpio utilizados en esta investigación.....	34
Fig. 4-2: Curvas granulométricas de muestras de relaves.....	36
Fig. 4-3: Curvas granulométricas de muestras de suelos.....	36
Fig. 4-4: Curvas granulométricas de mezclas de suelos.....	37
Fig. 4-5: Setup experimental.....	38
Fig. 4-6: Caja de control.....	39

Fig. 4-7: Cámara multispectral en el rango visible (izquierda) y en el rango cercano al infrarrojo (derecha).....	40
Fig. 4-8: Iluminación de láser.....	41
Fig. 4-9: Circuito de alimentación de láser.....	41
Fig. 4-10: circuito de conexión de láseres y mini procesador Raspberry pi.....	42
Fig. 4-11: Esquema de molde de probetas.....	43
Fig. 4-12: Probeta de relave.....	43
Fig. 4-13: Imágenes de sección de probeta desde un estado saturado (izquierda), hasta el estado seco (derecha).....	45
Fig. 4-14: Probeta con sección rectangular homogénea.....	45
Fig. 4-15: Diagrama de ensayos a realizar.....	47
Fig. 5-1: Relación contenido de humedad y reflexión de luz en Tramo A para todos los relaves.....	50
Fig. 5-2: Reflexión de luz versus longitud de onda para los 4 relaves evaluados.....	50
Fig. 5-3:Comportamiento de NDVI para los 4 relaves evaluados.....	52
Fig. 5-4: Iluminación de láser en el espectro visible (a) y en el espectro cercano al infrarrojo (b).	53
Fig. 5-5: Evaluación de Tramo A y Tramo B para los 4 relaves.....	56
Fig. 5-6: Histograma de reflexiones de luz asociada a cada humedad.....	57
Fig. 5-7: Efectos de la densidad seca en la relación reflexión de luz y contenido de humedad.	58
Fig. 5-8: Efecto del contenido de finos en la relación de reflexión de luz y contenido de humedad.....	60
Fig. 5-9: Evolución de (w^*) con el aumento del contenido de finos.....	61
Fig. 5-10: Ejemplo de estimación de humedad a partir de reflexión de luz e índice NDVI.....	64
Fig. 0-1: Esquema que representa el ángulo sólido.....	72
Fig. 0-2: Haz de luz reflejado.....	74
Fig. 0-3: Haz de luz transmitido.....	74
Fig. 0-4:Haz de luz absorbido.....	75

Índice de Tablas

Tabla 3-1: Capacidad máxima de deshidratación de relaves en espesadores.....	22
Tabla 4-1: Origen de muestras de relaves.	33
Tabla 4-2: Origen de muestras de suelo.	33
Tabla 4-3: Resultados de caracterización de las muestras de relave y suelo.....	35
Tabla 4-4: Resultados de caracterización de mezclas de Suelo 1 y Suelo 2.	37
Tabla 4-5: Configuración de cámaras.....	40
Tabla 4-6: Humedad de saturación de las muestras.	44
Tabla 4-7: Composición de mezclas de muestras de relaves y suelos.....	44
Tabla 5-1: Relación entre humedad de inflexión y límite de contracción en muestras de relaves.....	54
Tabla 5-2: Relación entre humedad de máxima y humedad de saturación en muestras de relaves.....	54
Tabla 5-3: Variación de w^* y reflexión de luz debido al cambio de densidad.....	58
Tabla 5-4: Porcentaje de arenas, limos y arcillas de las muestras de ensayo.	61
Tabla 5-5: Resultados de reflexión y w^* para las muestras de relaves y suelos.	62

CAPÍTULO 1: Introducción

Los depósitos de relaves son obras de ingeniería de gran envergadura diseñadas para almacenar residuos provenientes de la minería multimetálica. Actualmente, existen varios tipos de depósitos, los cuales varían según el contenido de humedad del relave y la forma de depositación. El tipo de depósito más habitual corresponde a tranques de relave (SERNAGEOMIN, 2020), en donde el relave es depositado como “slurry” con contenidos de humedad gravimétrica inferior al 60%. El resto de los depósitos se caracterizan por disponer relaves con contenidos de humedad más bajos, correspondiendo a espesados ($\approx 42\%$ de humedad), en pasta ($\approx 10\text{-}25\%$ de humedad) y filtrados ($< 20\%$ de humedad) (Decreto Supremo N° 248, 2007).

Hoy en día, las tasas de producción de relaves en Chile son de 1.7 millones de toneladas diarias, lo que genera la necesidad contar con depósitos como Laguna Seca en Antofagasta, que presenta una capacidad de diseño por sobre los 4.500 millones de toneladas, o muros de tranques con alturas que bordean los 200 m, como lo es el caso del depósito Los Quillayes en Salamanca (SERNAGEOMIN, 2020). Por otro lado, se estima que el nivel de producción aumentará significativamente en las próximas décadas producto del alza en la demanda de minerales, las bajas leyes de mineral y la adopción de estrategias de extracción subterránea, lo que se traducirá en la necesidad de depósitos con mayores capacidades de almacenamiento (SERNAGEOMIN, 2020).

El Decreto Supremo N° 248, indica que para la aprobación de un depósito de relaves, se debe describir los sistemas de instrumentación que permitirán monitorear el comportamiento, controlando, entre otras variables, la presión de poros, los niveles freáticos, filtraciones, mientras que el Decreto 50, exige, sumado a lo anterior, el monitoreo de caudales afluentes y efluentes, pero en ninguno de los casos se solicita el monitoreo del contenido de humedad.

Para un adecuado manejo de los depósitos es necesario instrumentación que permita monitorear diversos parámetros tales como asentamientos, desplazamientos, filtraciones, entre otros (Alva & Escalaya, 2011), iniciativa que ha sido fortalecida en los últimos años a nivel nacional a través del programa Tranque, el cual propone una plataforma de monitoreo del desempeño de los depósitos, que genere una industria más transparente y que a la vez permita tomar mejores decisiones operacionales.

No obstante, existen variables que no son controladas de manera constante a pesar de su influencia tanto en la estabilidad física como química, como lo es el caso de la humedad. Lo anterior sucede principalmente por los riesgos asociados a la toma de muestras en la cubeta de los depósitos, generalmente en estados de muy baja densidad, lo que dificulta el acceso, traduciéndose en pérdida de información relevante en la toma de decisiones por parte de los operadores.

La necesidad de conocer el contenido de humedad en depósitos de relaves recae en su influencia tanto en decisiones operacionales como de estabilidad físico-química de la estructura. Algunas de las razones importantes de monitorear la humedad se describen a continuación:

- En el caso de relaves espesados, conocer la humedad permite determinar el momento óptimo para depositar la siguiente capa de relaves, lo cual ocurre al alcanzar el límite de contracción (Simms et al., 2010)
- Permitiría identificar la capacidad de escurrimiento de relaves, la cual se ve influenciada por los cambios de humedad en los depósitos (Che et al., 2018).
- Estimar el contenido de humedad permite conocer la tasa de evaporación del depósito, la cual depende del rango de humedad en el que se encuentre el suelo, influyendo en procesos de contracción (Simms et al., 2010), y en la evaluación del balance de aguas (Chapman et al., 2008).
- Conocer la humedad permite estimar la permeabilidad en suelos, la cual será mínima cuando los niveles sean cercanos a la humedad óptima de compactación (Wright et al., 1996).
- Se ha evidenciado que la saturación parcial en relaves podría favorecer la oxidación de sulfuros presentes en él, generando drenaje ácido, por lo que un adecuado control podría evitar fenómenos de inestabilidad química (Changul et al., 2010).
- Estimar la humedad podría ayudar en la evaluación de estabilidad física, ya que se ha evidencia que la resistencia cíclica en relaves se mantiene alta hasta un grado de saturación de aproximadamente un 70%, reduciéndose paulatinamente con el aumento de la saturación, hasta decaer bruscamente al alcanzar un 95% (Tsukamoto et al., 2014).

Dado que todos los relaves son depositados con un contenido de humedad considerable, que las dimensiones de los depósitos están tendiendo al alza (dificultando el control de variables en todo el volumen) y que no hay un adecuado control del contenido de humedad a pesar de su importancia, es que surge el desafío de implementar nuevas tecnologías que aporten un control más continuo y expedito de esta variable.

Respecto a esto, en la última década han surgido investigaciones que hacen uso de procesamiento de imágenes y espectrómetros para estimar humedades superficiales en suelos en áreas de estudio como la agricultura (Hassan-Esfahani et al., 2015) y la hidrología (Sadeghi, Jones, & Philpot, 2015).

Los primeros acercamientos al uso de esta tecnología fueron realizados en el área de agricultura los cuales se llevaron a cabo en laboratorio por (Dalal & Henry, 1986), el cual a través de espectrómetros en el rango NIR (1100-2500nm), evidenció que existe una relación entre la reflexión de luz y la humedad superficial en suelos agrícolas, la cual era influenciada por la granulometría del material, el color de la muestra y el contenido de carbono. Hallar esta relación entre la humedad y la reflexión de luz fue posible dado que la superficie de suelo refleja la luz en función de características como la estructura física del material, la composición mineralógica, las variables de estado, la rugosidad de la superficie y la longitud de onda de la luz (Gondek et al., 1994), lo que permite utilizar al suelo como un filtro de radiación incidente, y por tanto encontrar una relación entre las características de la intensidad espectral captada por sensores y las características de la superficie de este material.

En la misma línea de investigación se encuentra lo realizado por Muller & Décamps (2001), el cual encontró en pruebas de campo utilizando cámaras montadas en drones, una relación exponencial entre la humedad superficial de suelo y la reflexión de luz, para rangos de humedad mayores al 10%, observando que la relación también dependía de la longitud de onda y de la granulometría. Por otro lado (Weidong et al., 2003) investigó dicha relación en laboratorio, en donde hizo uso de la normalización por el estado seco de las probetas, lo que permitió realizar comparaciones entre resultados provenientes de distintas muestras.

En la última década se han encontrado relaciones entre la humedad en suelos y la reflexión de luz, en rangos de longitudes de onda acotados. Uno de ellos es la relación hallada por Sadeghi, Jones, & Tuller (2015) para longitudes de onda de 1650nm y 2210 nm, el cual, a través de monitoreo con espectrómetros a 11 muestras de suelos con distinta granulometría en proceso de desecación, observó un comportamiento lineal entre la reflexión de luz y el contenido de humedad, el cual disminuye a medida que las probetas poseen mayor contenido de arcilla, haciéndose más notorio para contenidos de arcilla superiores al 20%. Esta relación fue utilizada para generar curvas de succión en suelos (Babaeian et al., 2017), para la creación de perfiles de infiltración en suelos (Sadeghi et al., 2017), y estimación de tasas de evaporación (Babaeian et al., 2019), investigaciones llevadas a cabo en laboratorio.

Paralelo a los estudios de laboratorio con espectrómetros, se han generado estudios en terreno con el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV), los cuales contienen cámaras que captan imágenes espectrales a suelos con distinto contenido de humedad, con el fin de evidenciar la salud de terrenos para cultivos (Hassan-Esfahani et al., 2015). En lo estudiado por Hassan-Esfahani et al. (2015) se hace uso de redes neuronales (ANN), a la cual se le entrega información de humedad en terreno asociada a una intensidad espectral de cada imagen, la cual es almacenada por la red y utilizada para traducir futuras reflexiones de luz de las imágenes en humedad superficial. Por otro lado, en el mismo campo de la agricultura, se ha utilizado índices que permiten estimar la salud de cultivos a partir de la reflexión de luz, como lo realizado por Taktikou et al. (2016), el cual utiliza el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), para identificar el estado húmedo, seco o sin vegetación de terrenos fértiles.

En el campo de manejo de relaves el uso de imágenes espectrales para la estimación de humedad son limitados, encontrándose algunos estudios asociados a los desechos provenientes de la extracción de petróleo (Entezari et al., 2013). En la investigación de Entezari (2013), se realizaron estimaciones de humedad en muestras de relave de petróleo en el rango de longitud de onda entre los 350nm y los 2500nm, a través de un proceso de deshidratación de las probetas desde las cuales se fueron registrando reflexiones de luz a partir de espectrómetros, mostrando un comportamiento de la relación no lineal entre la humedad de las probetas y la reflexión de luz captada, la cual entregó buenos resultados para estimaciones de humedad superiores al 15%.

En la misma línea de investigación de relaves de petróleo, esta técnica fue utilizada para estimar el potencial de hinchamiento (Iman Entezari, Rivard, & Lipsett, 2017) a través de la medición de reflexión de luz y su relación con el contenido de metileno azul; el control de contenido de minerales arcillosos a partir de la influencia de la granulometría en la reflexión de luz (Iman Entezari, Rivard, Geramian, et al., 2017); y la efectividad de procesos de

floculación a través de la observación de flóculos en imágenes hiperespectrales que permitieron evidenciar la mezcla de floculante óptima (Iman Entezari et al., 2019).

Respecto al uso de esta tecnología para el estudio de humedad en depósitos de relaves provenientes de la extracción de metales, la investigación es aún más acotada, reduciéndose a lo desarrollado por Araya et al. (2019). Araya realizó ensayos de laboratorio en probetas de relave de cobre con humedades de 0% a 140%, y través de un proceso de desecación en horno a intervalos regulares, monitoreó la reflexión de luz, la cual normalizó por una paleta de colores Macbeth ColorChecker y el estado seco de las probetas, asociada a cada contenido de humedad. Para el monitoreo utilizó cámaras hiperespectrales en el rango visible (400nm a 700nm) y cercano al infrarrojo (700-1000nm), aplicando iluminación natural y activa a través de láser de 980 nm.

El uso de iluminación activa empleado por Araya fue una buena opción para acotar la longitud de onda de estimulación, la cual reduce el ruido espectral proveniente de la luz natural, correspondiente a luz pasiva, dado que la luz solar contiene todo el espectro de luz, aumentando la dispersión de resultados. El láser permitió tener resultados similares a lo que se podría encontrar con espectrómetros, los cuales son capaces de filtrar el rango espectral, dado que se trabajó con la longitud de onda acotada del láser, técnica no convencional, pero que arrojó resultados claros.

Araya et al. evidenció una relación parabólica entre la reflexión de luz y el contenido de humedad en el rango de humedad inferior a la saturación y un decaimiento de la reflexión de luz para humedades superiores. Además, calculó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el que le permitió interpretar los resultados de la relación entre la reflexión de luz y el contenido de humedad.

Con el fin de fortalecer el estudio realizado por Araya, se continua la investigación, considerando la variabilidad material y temporal a la que están sujetas los depósitos de relaves (Villavicencio et al., 2011), variables que no fueron consideradas por Araya, tales como granulometría, origen del relave, densidad, longitudes de onda de estimulación, entre otras. Frente a lo anterior, surge la pregunta si existen otros parámetros adicionales de relevancia que puedan afectar el comportamiento de la relación encontrada entre la reflexión de luz y humedad en depósitos de relaves, disminuyendo la precisión en la estimación de la humedad superficial, llevada a cabo en esta primera investigación. Algunas de ellas corresponden a propiedades geotécnicas de los relaves tales como: granulometría, peso específico, densidad in-situ, minerales constituyentes.

En este trabajo se presentan la investigación de una serie de pruebas de laboratorio en donde se sigue un procedimiento similar al efectuado por Araya et al (2019), montando probetas de muestras de relaves, evaluando rangos de humedad desde 0% hasta superior a la saturación. Las probetas son secadas en horno por 10 minutos a 100°C y luego fotografiadas por dos cámaras multiespectrales en el rango VIS y NIR antes descrito, las cuales son asociadas a la humedad de las muestras de ese momento. Las probetas son estimuladas por iluminación natural y activa mediante láser a 405 nm, 450 nm, 520 nm, 650 nm, 780 nm, 830 nm y 980 nm, de manera de abarcar gran parte del espectro visible y cercano al infrarrojo. Los ensayos se realizan a muestras de relaves provenientes de la extracción de minerales de oro, cobre, hierro y multimineral. Se evalúa el efecto de la compactación realizando ensayos en el rango de densidades de 1.30 gr/cc hasta 1.70 gr/cc. Además, se incorpora el efecto del contenido

de finos en la relación, generando probetas de cada relave con contenido de finos desde 0% hasta 100%. Por otro lado, se realizan ensayos de mezclas de suelo natural provenientes de arena de Ottawa estandarizada con arcilla esmecítica, con el fin de identificar patrones comunes de comportamiento en suelos y relaves. De esta forma se estudia la relación entre la reflexión de luz normalizada por el estado seco y el contenido de humedad superficial de relaves, incluyendo una mayor compresión del fenómeno para así generar una herramienta útil en la estimación de la humedad.

CAPÍTULO 2: Objetivos

2.1. Objetivo general

- Estudiar la evolución de la humedad superficial en distintos tipos de relaves incluyendo variabilidad de sus propiedades geotécnicas, utilizando imágenes multiespectrales en un amplio rango de longitudes de onda aplicando técnicas pasivas y activas de iluminación.

2.2. Objetivos específicos

- Generar una curva representativa del comportamiento de la relación entre la reflexión de luz y el contenido de humedad superficial en depósitos de relaves.
- Evaluar la influencia del contenido de finos, densidad, y origen del relave (desechos provenientes de la extracción de distintos minerales) en la relación entre la reflexión de luz y contenido de humedad.
- Analizar la influencia de parámetros geotécnicos, tales como el límite de Atterberg y humedad de saturación, en la curva que representa el fenómeno de reflexión de luz en función del contenido de humedad.
- Comparar el comportamiento del fenómeno de reflexión de luz en depósitos de relaves con lo obtenido en suelos limpios a partir de mezclas provenientes de arena de Ottawa y arcilla esmecítica, identificando patrones comunes entre suelos y relaves.

CAPÍTULO 3: Marco Teórico

En esta sección se presentan los conceptos teóricos asociados a las fuentes de luz, fenómenos tales como reflexión, refracción y absorción, tipos de sensores de luz, almacenamiento de luz en imágenes, tipos de relaves y el efecto de la humedad en depósitos de relaves. Esta información ayudará a abordar la presente tesis de título.

3.1. Fuentes de luz

3.1.1 Luz natural

La luz solar corresponde al espectro completo de radiaciones electromagnéticas provenientes de la estrella central del Sistema Solar, el Sol, siendo este una fuente de energía natural. La luz emanada está formada por “paquetes de energía” que contienen fotones, los cuales viajan con un patrón sinusoidal y se trasladan a la velocidad de la luz (3×10^8 m/s). Lo anterior permite clasificar la energía en bandas que agrupan rangos de luz en función de sus características espectrales, las cuales dependen de la longitud de onda a la que se encuentra la emisión. La literatura (Clark, 1999), permite clasificar las bandas del espectro solar como se muestra en Fig. 3-1.

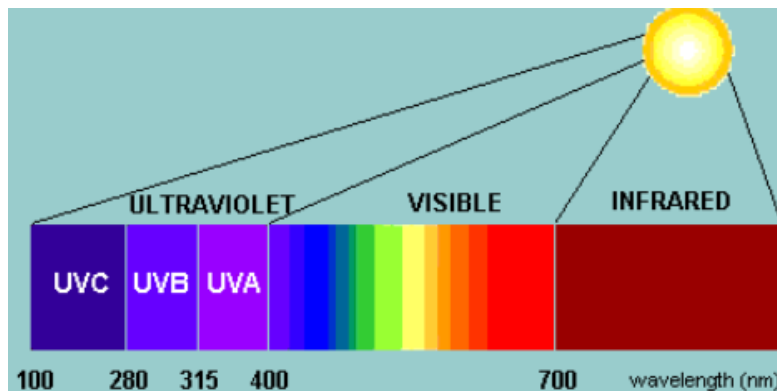


Fig. 3-1: Espectro de luz solar.
Fuente: Schack (2021).

La luz solar se caracteriza no solo por poseer todo el espectro de luz a la vez, lo que se traduce en longitudes de onda de 100 nm hasta 1 mm, sino que también las ondas emitidas se encuentran en distinta fase.

Las radiaciones electromagnéticas se pueden dividir en tres grandes bandas llamadas infrarrojo, visible y ultravioleta, los que a su vez se subdividen en subcategorías espectrales, en función de la información específica que contiene cada banda (Brune et al., 2003). A continuación, se detallan las características de las bandas espectrales de luz solar y sus subcategorías.

- **Rango de Luz Ultravioleta (UV):** La luz ultravioleta corresponde a radiación electromagnética que se encuentra en el rango de longitud de onda de 100 nm hasta 400 nm, limitada por las bandas de luz visible y rayos X. Constituye aproximadamente el 7% de la radiación solar. Queda subdividida por tres bandas específicas llamadas UVC (ultravioleta de onda corta), UVB (ultravioleta de onda media), UVA (ultravioleta de onda larga), siendo UVA la luz UV con longitud de onda más larga, seguida por UVB y UVC que posee longitud de onda más pequeña. Los rangos de longitud de onda que limitan estas sub-bandas son 320nm hasta 400 nm para UVA, para UVB 280 nm hasta 320 nm, y 100nm hasta 280 nm para UVC.

Los rayos de luz UVA y UVB pueden pasar la atmosfera, mientras que los rayos UVC quedan atrapados en la capa de ozono, por lo que la única forma de captar esta luz en la superficie terrestre es en las zonas donde la capa está deteriorada o a través de luz artificial proveniente por ejemplo desde láser y lámparas.

- **Rango de Luz Visible (VIS):** La luz visible corresponde al espectro electromagnético en el cual el ojo humano actúa como sensor, es decir, logra visualizar la luz y algunas de sus características en este rango, el cual comprende una longitud de onda de entre 400 nm hasta 700 nm. El rango visible está acotado por la banda de luz UV y la luz infrarroja, abarcando aproximadamente el 47% de la energía solar. En esta es posible identificar los colores que conocemos.

El color con menor longitud de onda en el espectro visible corresponde al violeta, el cual abarca un rango de entre 400 nm hasta 450 nm, luego sigue el azul con longitudes de onda entre 450 nm hasta 495 nm, seguido por el color verde presente en longitudes de onda de 495 nm hasta 570 nm, continuando con el amarillo a longitudes de onda de entre 570 nm hasta 590 nm, llegando al naranja con un rango de 590 nm hasta 620 nm y finalmente el color con mayor longitud de onda corresponde al rojo abarcando el rango de 620 nm hasta 750 nm. Por otro lado, cuando todas las longitudes de onda del espectro visible penetran a la vez el ojo humano es posible identificar el color blanco.

- **Rango de Luz Infrarroja (IR):** La luz infrarroja corresponde al espectro de luz con longitud de onda más larga de la luz solar y a la vez la que abarca el mayor rango de longitudes de onda, comprendiendo entre 750 nm hasta los 1000000 nm. Queda acotada por la banda de luz visible (VIS) y por la energía en el rango de microondas (no presentes en la luz solar), y corresponde aproximadamente al 46% del espectro solar. Este rango espectral no es visible a los ojos, sin embargo, es posible sentirlo como energía térmica, siendo la piel un sensor de la luz IR.

Esta gran banda espectral es dividida en tres subbandas, correspondientes al infrarrojo cercano (NIR), infrarrojo medio (MIR) e infrarrojo lejano (FIR). La banda (NIR) corresponde al espectro de luz que comprende una longitud de onda entre 700 nm hasta los 3000 nm, también denominado infrarrojo de onda corta, el que además comprende el inicio de la energía térmica, entre los 2500nm hasta 3000 nm. Por su parte la banda (MIR) corresponde al rango del espectro de luz que comprende el peak

de la energía térmica, el cual abarca entre los 3000 nm hasta los 30000 nm. Finalmente, la banda (FIR) posee radiación a longitudes de onda entre los 30000 nm hasta 1 mm, también conocido como infrarrojo de onda larga.

En áreas de estudio como lo es la de sensores remotos (remote sensing), suele hacerse uso de la banda VNIR (visible near infrared) y SWIR (short wave infrared). VNIR comprende el rango de longitud de onda de 400 nm hasta 1000 nm, juntando el espectro visible y el inicio de la banda NIR, mientras que SWIR abarca el rango de 1000nm hasta 2500 nm, tomando la última parte del rango NIR.

3.1.2 Luz artificial:

Además de la fuente natural de luz, existen fuentes artificiales, las cuales son usadas para recrear los paquetes de energía que emite el espectro solar, en condiciones de ambiente controlado (Castro, 2019). Uno de los ejemplos son lámparas y laser. Dentro de las más comunes se encuentran las fuentes de luz que emiten energía dentro del rango VIS, para iluminación ambiental; y en el rango NIR y UV con fines industriales, comerciales y medicinales. A continuación, se describen algunos de las fuentes emisoras de luz artificial:

- Láser: Dispositivo construido para crear un haz de luz donde todos los fotones están en un estado coherente, es decir, se encuentran a la misma frecuencia y fase, lo que genera el efecto de rayo que se observa normalmente.

El láser funciona excitando electrones presentes en cristales, vidrio o gases especiales, los cuales absorben energía de otra corriente eléctrica. Estos electrones se mueven de una órbita de menor energía a una de mayor energía alrededor del núcleo del átomo, los cuales, al volver a su estado fundamental, emiten fotones, situación esquematizada en Fig. 3-2. Estos fotones, tienen la misma longitud de onda y se encuentran en igual fase, lo que quiere decir que sus ondas están sincronizadas. Los fotones pasan a través de dos espejos, los que generan una amplificación del haz, los que finalmente se emite por una ranura del láser. La longitud de onda particular de la luz emitida está determinada por la cantidad de energía liberada cuando el electrón excitado cae a una órbita más baja.

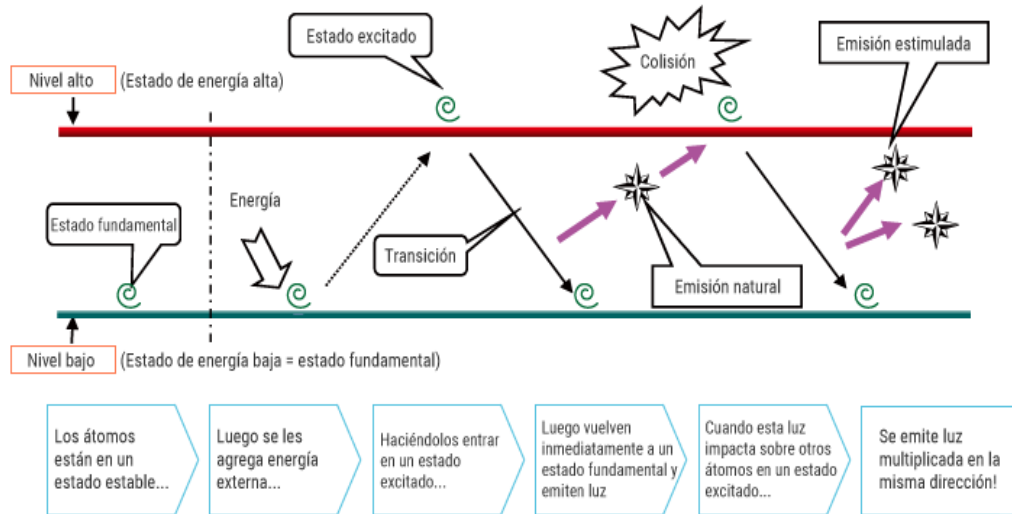


Fig. 3-2: Funcionamiento de láser convencional.
Fuente: Guía técnica láser.

3.2. Fenómeno de reflexión, refracción y absorción de luz

La luz, al ser emitida ya sea desde una fuente natural o artificial, continúa viajando a través de un medio de forma finita. La “integridad” de la energía va liberándose a medida que aumenta la distancia desde el punto de origen y la ubicación del paquete de fotones. Este fenómeno queda determinado por la “Ley del Cuadrado Inverso” propuesta por Hooke en 1679, la cual explica que la irradiancia o iluminancia varían inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de interés, situación presentada en Fig. 3-3, siendo E_f la iluminancia o irradiancia a una distancia d desde la fuente y E_i la iluminancia o irradiancia inicial.

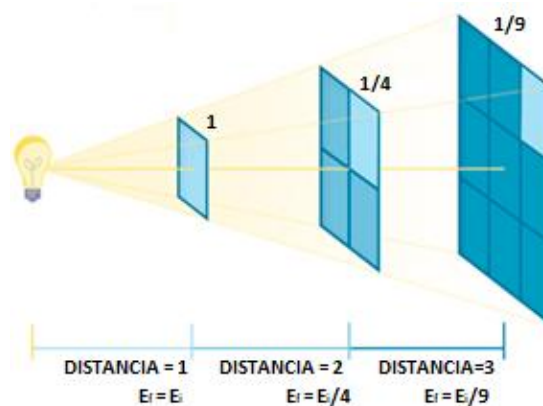


Fig. 3-3: Esquema de “Ley del cuadrado inverso”
Fuente: Modificado del departamento de física y astronomía de la universidad de Georgia.

Cuando la luz se encuentra con un medio que posee un índice de refracción distinto al medio por el que está viajando, parte del haz se refleja y otro se refracta, donde se genera un cambio en la dirección de propagación de la onda reflejada y en las características espectrales de la luz. Este fenómeno se ve influenciado por los índices de absorbancia y refracción de la superficie, los que dependerán de las características físicas y químicas del material, además de la longitud de onda de la luz incidente. El coeficiente de absorbancia es inversamente proporcional a la longitud de onda, por lo que, a mayores longitudes de onda de la luz, menor será la luz absorbida por el medio, y por lo tanto mayor será la luz reflejada. Por otro lado, las características químicas del material incidente determinarán el cambio espectral de la luz reflejada y absorbida, ya que, en el rango visible, el color de los objetos que observamos corresponde a la longitud de onda que no es capaz de absorber el material, lo cual explica que la luz solar permita ver los “colores” de las superficies en las que incide. Además, las características físicas de la superficie definirán si la reflexión de luz será especular o difusa, donde una superficie perfectamente lisa permitirá reflejar todos los haces de luz en la misma dirección, manteniendo la densidad de la luz, mientras que una superficie rugosa evidenciará una reflexión difusa, dado que los haces de luz se reflejaran en distintas direcciones.

Por otro lado, en el fenómeno de reflexión de luz, la onda es propagada por el mismo plano por el que venía la onda incidente, y además el ángulo de incidencia es el mismo al ángulo de reflexión. Acá, la onda reflejada no cambia de velocidad, no obstante, el ángulo de incidencia de la luz en la superficie afecta a la densidad de la luz reflejada, según la “Ley del Coseno de Lambert”, la que explica que el flujo de luz reflejada será función del coseno del ángulo incidente. Esto quiere decir que, a mayor ángulo de inclinación, menor será la densidad de la luz reflejada, tal como se muestra en Fig. 3-4 (Brune et al., 2003).

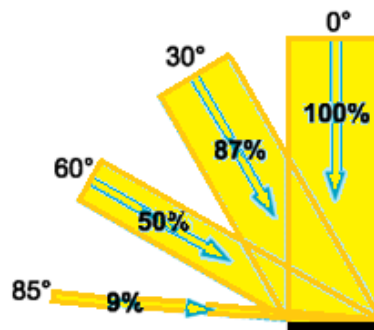


Fig. 3-4: Esquema de “Ley del coseno de Lambert”.

Fuente: Modificado del departamento de física y astronomía de la universidad de Georgia.

Por otro lado, no toda la luz incidente es reflejada, también hay una parte de ella que se refracta, es decir, al llegar a la superficie, una parte de luz pasa a través de la superficie, cambiando de dirección y velocidad según la “ley de Snell”, pero manteniéndose en el plano de origen. Snell entrega la inclinación respecto a la vertical, con la que la onda viajará por el nuevo medio, la cual depende del índice de refracción n , el cual es propio de cada material. La situación se esquematiza en Fig. 3-5.

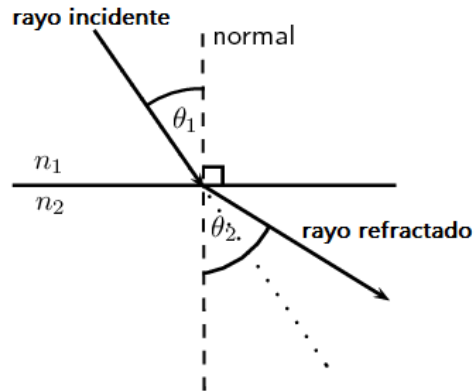


Fig. 3-5: Esquema de “Ley de Snell”.
Fuente: Física Atractiva (2001).

donde n_1 y n_2 , son el índice de refracción para el medio 1 y 2 respectivamente, mientras que θ_1 y θ_2 corresponden a la inclinación respecto de la vertical de la onda de luz viajando por el medio 1 y 2 respectivamente.

Las propiedades del material quedan intrínsecamente representadas en el coeficiente de refracción de cada material, que queda demostrado en el cambio de variación del ángulo de propagación al pasar de un material a otro.

Una vez que la onda es refractada, esta puede ser absorbida por el material o lograr pasar a un nuevo medio de propagación. Este proceso afecta a la variación entre la luz incidida y la reflejada, permitiendo definir al material como un filtro de radiación incidente. Lo anterior se puede resumir en Ec. 3.1, donde la energía incidente (E_i) es igual a la sumatoria de la energía reflejada (E_r), energía absorbida (E_a) y energía transmitida (E_t).

$$E_i = E_r + E_a + E_t \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Una vez que la luz incide en una superficie con distinto índice de refracción, una parte de luz se refleja y la otra se refracta. La cantidad de luz reflejada depende del índice de refracción compleja (m), descrito según Ec. 3.2.

$$m = n - jK \quad (\text{Ec. 3.2})$$

donde n es la parte real del índice y K es la parte imaginaria o a veces llamada extinta (Clark, 1999). Además, cuando los fotones entran en un medio, éstos son absorbidos bajo la “Ley de Beers”, según Ec. 3.3.

$$I = I_0 e^{-kx} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

donde I es la intensidad de luz observada, I_0 es la intensidad inicial, k el índice de absorción y x la distancia recorrida por los fotones. Se observa que k y K están relacionados a través de la longitud de onda (λ) del rayo de luz, como se muestra en Ec. 3.4.

$$k = \frac{4K}{\lambda} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Finalmente, la cantidad de luz reflejada queda determinada por la “Ley de Fresnel” según Ec. 3.5, la que explica que la reflexión de luz dependerá del índice de refracción real, de la longitud de onda y de la capacidad de absorción del medio.

$$R = \frac{(n - 1)^2 + K^2}{(n + 1)^2 + K^2} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Cabe destacar que Ec. 3.5 es válida para cuando la luz incide perpendicular a la superficie, ya que cuando existe inclinación de la onda, la ecuación que rige el fenómeno es una función trigonométrica compleja, que no será expuesta en este trabajo, dado que no se hará uso de ella.

3.3. Métodos de medición de intensidad de luz reflejada

Para conocer la intensidad de luz reflejada, es posible medir la reflectancia, correspondiente al flujo de luz reflectado, a través de sensores. Como se mencionó en el acápite anterior, cada superficie reflejará la luz de forma particular en función de sus propiedades físicas y químicas, lo que lleva a poder utilizar la medición de reflectancia como un indicador de características de la superficie de interés. Ejemplo de esto es el ojo humano, conocido como filtro natural que permite captar la luz en rango espectral visible, entregando información respecto al color del material. No obstante, la luz visible es solo rango estrecho del espectro completo de la radiación solar, por lo que el ojo humano no puede evidenciar toda la información generada en el proceso de reflexión (Gevaux, 2020). Dado esto, la ciencia se ha visto en la necesidad de desarrollar sensores artificiales de energía espectral que permitan captar bandas en rangos de longitud de onda distintas a las del espectro visible, la que posteriormente puede traducirse en información de interés.

Actualmente se pueden identificar dos tipos de sensores dependiendo de la forma en la que trabajan: sensores activos y sensores pasivos. La diferencia entre ambos tipos radica en la capacidad de emitir o solo recibir flujo radiante, la cual se detalla a continuación.

3.3.1 Sensores activos

Los sensores activos tienen la capacidad de emitir un haz energético, que posteriormente captan tras su reflexión sobre la superficie que se pretende observar. La característica de la

onda electromagnética reflejada corresponde con la reflectividad de la superficie estudiada. Esta tecnología se usa principalmente en los sistemas radar y lidar (Chuvienco, 2008).

- Sistema radar: Funcionamiento basado en emitir un impulso de radio (longitudes de onda comprendidas entre 0.1 cm y 1m), que se refleja en el objetivo y es reflectado. A partir de las características de la onda de reflexión se obtiene información del objeto. Tienen una gran importancia en el ámbito meteorológico.
- Sistema lidar: Funciona emitiendo pulsos de luz en rangos espectrales entre luz UV y NIR. En función del tiempo y la intensidad de la señal reflejada, se obtienen datos de altura y distancia de los objetos. Ampliamente utilizados para generar modelos de elevación digital.

3.3.2 Sensores pasivos

Estos sensores captan energía espectral proveniente de superficies, ya sea producto de la reflexión de los rayos solares o emitida desde fuentes artificiales. Algunos sensores más comunes se describen a continuación.

- Espectrómetros: Instrumento para medir la variación de flujo radiante proveniente de una superficie, en función de la excitación mediante luz a diferentes longitudes de onda. Este es altamente utilizado para determinar características físicas y composición química del material. Principalmente utilizado en laboratorios, con algunas aplicaciones en terreno.
- Cámaras hiperespectrales: Cámaras que captan imágenes que involucran bandas espectrales estrechas y contiguas, incluyendo varios espectros, según la resolución de la cámara, pudiendo llegar al orden de los cientos de bandas.
- Cámaras multiespectrales: Cámaras que captan bandas espectrales de diferentes anchos de banda y no necesariamente contiguas. Normalmente poseen menor resolución que las cámaras hiperespectrales, teniendo alrededor de 10 a 15 bandas, las que a su vez son más anchas.
- Satélites artificiales: Cuerpos que rodean la tierra y permiten obtener información a través de la recolección de datos mediante sensores, entre ellos, imágenes multiespectrales.

Las cámaras son un tipo de sensor de luz que procesa la reflexión de luz almacenada en imágenes, estas pueden ser RGB, multiespectral o hiperespectral, las cuales se van a diferenciar, entre otras cosas, en función del número de bandas que posee el sensor, lo que se explica en detalle en el acápite siguiente.

3.4. Imágenes como almacenamiento de información

Como se comentó anteriormente, existen sensores de luz que poseen la capacidad de almacenar información de reflexión de luz en imágenes, utilizando una resolución en función del tamaño de píxel que posee la imagen. El píxel corresponde a una división de la imagen, formada por una matriz, que en su conjunto permiten representar la información almacenada. La resolución de la imagen se mide en PPI (pixel per inch), que corresponde a número de píxeles por unidad de pulgada, por lo tanto, a mayor PPI, se tendrá mayor calidad de imagen, dado que existe una mayor densidad de píxeles.

La forma de representar la intensidad de luz en un píxel es través de la profundidad de bits, o, mejor dicho, la cantidad de bits por píxel. Cuanto más sea la profundidad, mayor será la cantidad de tonos que se puede representar en la imagen (Gevaux, 2020). En función de la cantidad de bits se pueden definir las siguientes escalas de colores.

- Imagen bitonal: Representada por píxeles que constan de 1 bit y poseen un canal, por lo tanto, solo pueden tomar dos colores, siendo el valor 0 para el negro y 1 para el blanco.
- Imagen a escala de grises: Compuesta por píxeles que tienen entre 2 a 8 bits y un solo canal. La cantidad de bits permite generar 2^x cantidad de combinaciones, siendo x el número de bits. Por ejemplo, si se tiene un píxel con 2 bits, la cantidad de tonos posibles es de 4.
- Imagen a color: Poseen entre 8 a 24 bits. Las imágenes de 24 bits están divididas en tres canales, 8 para el rojo, 8 para el verde y 8 para el azul. Cada canal posee una capacidad de combinación de 256 bits, lo que permite a la imagen tener un total de 16.7 millones de tonos por píxel.

El contraste de los tipos de imágenes descritas se presenta en Fig. 3-6.



Fig. 3-6: Imágenes con a) 1 bit, b) 2 bits y c) 8 bits.

Fuente: Castro, 2019.

Lo anterior permite identificar información del material fotografiado, en función del valor que posea cada píxel en la escala de 0 a 255, siendo 0 la ausencia de luz y 255 el color blanco o saturación del píxel. Un ejemplo de esto se puede observar en Fig. 3-7, donde se muestra un píxel de color rosado, formado a partir del espectro visible en los canales RGB, con sus correspondientes valores en cada canal.

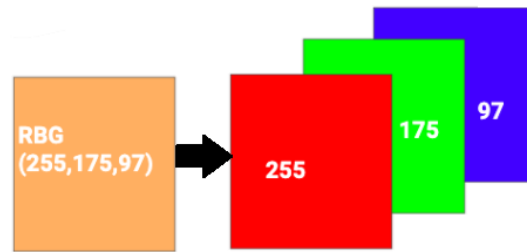


Fig. 3-7: Numeración de bandas RGB para la formación de un color particular.
Fuente: Modificada de Gevaux, 2020.

Cada píxel posee canales de información, que corresponden a bandas espectrales, que almacenan la luz en función de la longitud de onda. En general, existen tres tipos de imágenes en función del número de bandas espectrales, las cuales se describen a continuación.

- RGB (red- green- blue): Imagen que posee tres canales, correspondientes a las bandas rojo, verde y azul. Esta imagen entrega información en el espectro visible de la luz, y es el que ocupa la mayoría de las cámaras comerciales.
- Multiespectral (MSI): Este tipo de imágenes dividen la luz en pequeño número de bandas espectrales, generalmente entre 3 y 15 bandas, las cuales son de distinto ancho de banda y generalmente no equiespaciadas. Esto permite almacenar información de reflexión de luz fuera del espectro visible, ya que suelen incluir bandas en el rango NIR y VIS, descritos anteriormente. El uso de este tipo de imágenes normalmente es por parte de satélites y cámaras multiespectrales.
- Hiperespectral (HSI): Al igual que las imágenes multiespectrales, estas imágenes dividen la luz en bandas que incluyen espectros más allá del rango visible, sin embargo, la cantidad de bandas son muchas más que en el caso anterior, pudiendo almacenar información más precisa, las que a su vez poseen el mismo ancho de banda y se encuentran equiespaciadas. Normalmente usadas en laboratorio para un mayor alcance del espectro de luz.

En Fig. 3-8, es posible observar cualitativamente la continuidad de la información en función del número de bandas que posee cada imagen.

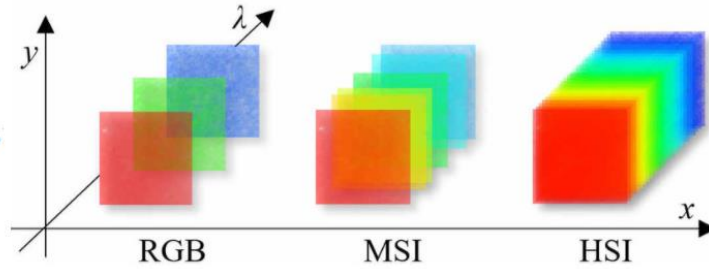


Fig. 3-8: Esquema de cantidad de bandas por tipo de imagen; RGB(red, green, blue), MSI(imagen multispectral), HSI(imagen hiperespectral).

Fuente: Gevaux, 2020.

Por otro lado, las imágenes que se captan bajo cualquier cámara tienen ciertos parámetros de configuración que permiten que un mismo instrumento obtenga distintas imágenes desde un mismo lugar. Algunos de ellos se definen a continuación (Jones, 2014).

- Nitidez: Claridad con la que se representan los detalles en la fotografía, la cual se ve afectada por la resolución de la cámara y el tipo de lente. Se configura como un número entero entre -100 y 100, y el valor predeterminado es 0.
- Contraste: Diferencia entre el color más claro y el más oscuro de la imagen. Se configura con un número entero entre -100 y 100, y el valor por defecto corresponde a 0.
- Brillo: Luz recibida a través del lente de la cámara. Se cuantifica con un número entero de entre 0 y 100, el valor por defecto es de 50.
- Saturación: Intensidad de cada color en una foto, según el grado de blanco, negro y gris de su composición. Un color saturado es un color puro, dada la ausencia del gris. Se configura con valor entero de -100 a 100, y su valor predeterminado es 0.
- ISO: También llamada ASA, corresponde la sensibilidad a la luz de la cámara, y su nombre es debido a la organización que lo definió llamada “International Organization for Standardization”. El rango de valores va de 0 a 1600, y se introduce en múltiplos de 100, siendo 0 el valor automático, mientras que 100 es menor sensibilidad y 1600 la más alta. El valor predeterminado es 0, lo que quiere decir que la cámara busca el mejor ISO para la composición.
- Compensación de exposición: Corrección del sistema de medición de luz de la cámara, captando más o menos luz según corresponda. El rango de valores va de -25 a 25, siendo los valores más altos imágenes más brillantes, siendo el valor 0 el predeterminado.

- Modo de exposición: Configuraciones de imagen que permite obtener imágenes en distintas tonalidades. Algunas opciones disponibles son “auto”, “night”, “sport”, entre otras.
- Modo de medición: Determina el método por el cual la cámara selecciona la exposición dividiendo el encuadre en una zona central y otra externa, presentando las opciones de “average”, “spot”, “matrix” y “backlit”. La diferencia entre las opciones data del tamaño de la exposición central y externa, siendo el modo “backlit” el que presenta la sección central más grande y el modo “spot” el de zona central más pequeña. El valor por defecto corresponde a la opción “average”.
- Velocidad de obturación: Es el tiempo que transcurre entre la apertura del obturador y su cierre, medida en microsegundos. En ese periodo la luz impacta al sensor y se forma la imagen. A mayor velocidad, menos tiempo de exposición, y se ocupa para escenas en movimiento, mientras que las velocidades más lentas son útiles para lugares con menor exposición de luz. Cuando el valor es 0, corresponde a la opción automática, mientras que el máximo de velocidad más común es de 1/2000 ms.
- Resolución: Corresponde al número de píxeles del sensor, con el cual será generada la imagen. A mayor número de píxeles se tiene una mejor calidad de imagen dado el mayor almacenamiento de información. Esta propiedad varía entre cámaras.

3.5. Medición de reflexión de luz para determinar variables de interés en suelos

A partir de lo hallado en la literatura, se ha demostrado que los materiales actúan como filtros de luz a partir de sus características físicas y químicas, permitiendo así evaluar variables de interés a través de la medición de reflexión de luz, lo que ha sido útil en un amplio rango de áreas de estudio, desde la medicina (a través. por ejemplo, de los rayos X), hasta la ingeniería (como el uso de espectrómetros para la medición de sustancias). Esta tecnología también ha sido aplicada en suelos a partir de áreas de investigación como lo son la agricultura, hidrología y relaves de petróleo.

En agricultura, uno de las primeras aplicaciones observadas fue la identificación de contenidos carbono y humedad en suelos a partir de medición de reflexión de luz a través de espectrómetros en el rango NIR, entre los 1100 nm hasta los 2500 nm (Dalal & Henry, 1986). La investigación realizada por Dalal permitió hacer uso de los suelos como filtros espectrales de luz, a partir de tanto la composición química como física de los materiales, encontrando diferencias en el espectro de luz reflejado a partir de suelos de distinto color, contenido de humedad, contenido de carbono y granulometría, lo que explicaría las diferencias en la reflexión de luz. Lo hallado por Dalal abrió paso a nuevas investigaciones en la misma área, donde se encuentran estudios de campo, que a través del uso de cámaras espectrales lograron evidenciar una relación exponencial entre la humedad superficial en suelos de cultivo y la reflexión de luz almacenada en las imágenes captadas (Muller & Décamps, 2001).

Actualmente, el uso de la reflexión de luz como monitoreo de variables en suelos agrícolas es altamente utilizado principalmente para evidenciar áreas de estrés hídrico, con el fin de regular los sistemas de riego, y otras variables de interés como identificación del contenido de nutrientes en suelos, evaluación de plagas y/o enfermedades en cultivos, y realizar control de distribución de los cultivos. Por otro lado, también se hace uso del NDVI con el fin de evaluar la actividad fotosintética de las plantas, y así reconocer la salud de los cultivos.

En áreas de estudio como la hidrología, también se ha investigado sobre la aplicación de mediciones de reflexión de luz para el control de variables de interés. Una de ellas fue llevada a cabo por Sadeghi, et al. (2015), el cual, a través de espectrómetros, encontró una relación entre la reflexión de luz y el contenido de humedad superficial en suelos, cuyo comportamiento era lineal para suelos con nivel del contenido de finos menor al 20%. La relación encontrada por Sadeghi permitió que se siguiera indagando en la estimación de variables de interés en suelos a través de la medición de reflexión de luz, ya sea por espectrómetros o cámaras multiespectrales, donde destacan: la generación de curvas de succión en suelos, a partir de la medición de humedad proveniente de la curva hallada por Sadeghi (Babaeian et al., 2017); La estimación de perfiles de infiltración en suelos, a través de la medición de humedad superficial con la curva de Sadeghi (Sadeghi et al., 2017); La evaluación de tasas de evaporación a partir de la humedad superficial obtenida con la curva de Sadeghi (Babaeian et al., 2019). Actualmente, las mediciones de reflexión de luz en suelos son utilizadas para la estimación de aguas subterráneas y la estimación de caudales en cuencas.

En el área de relaves, las investigaciones con reflexión de luz para la estimación de la humedad son acotadas a relaves de petróleo y recientemente a relaves de hierro. El uso de imágenes hiperespectrales en relaves de petróleo ha permitido estimar la humedad superficial en depósitos, previo investigaciones de laboratorio realizadas por Entezari (2013), donde se halla una relación entre la reflexión de luz y la humedad superficial de probetas de relave de petróleo en muestras de relave con un contenido de humedad superior al 15%. Por otro lado, la medición de reflexión de luz ha permitido estimar el potencial de hinchamiento de los relaves dada su relación con el contenido de metileno azul en los desechos (Entezari, et al., 2017). Además, la reflexión de luz ha mostrado relación con la granulometría de los relaves, lo que ha permitido llevar un control de los minerales arcillosos presentes en los depósitos (Entezari, et al., 2017).

Actualmente, dada la necesidad de generar un control continuo en la operación de depósitos de relaves, a nivel nacional se ha estado trabajando en el desarrollo del programa tranque, el cual pretende llevar los estándares de control de relaves a un mayor nivel de seguridad y confiabilidad, a través de la implementación de monitoreo de los depósitos entregando información oportuna para la evaluación de estabilidad y la toma de decisiones frente a eventualidades. El programa propone desarrollar una plataforma de monitoreo, de la mano de análisis eficientes de Big Data y el desarrollo del conocimiento para la interpretación de la data. Además, pretende fomentar la investigación, el desarrollo e innovación en la industria, lo que abre las puertas a nuevas tecnologías de monitoreo, más allá de la instrumentación obligatoria en la normativa vigente, que permitan evaluar variables de interés de formas más eficientes, o que incluso se monitoreen variables que no han sido controladas hasta el momento. Por lo tanto, el desarrollo de investigaciones para el monitoreo de contenido de humedad a través de la medición de reflexión de luz viene a entregar una

herramienta en desarrollo que aportaría directamente a los intereses nacionales de desarrollo en materia de relaves.

Una de las investigaciones más recientes en monitoreo de humedad a través de la tecnología de medición de reflexión de luz es lo presentado por Araya et al. (2019), el cual presentó una relación entre la reflexión de luz y el contenido de humedad en muestras de relaves de hierro a través del uso de cámaras multiespectrales, las cuales monitoreaban la reflexión de luz en el proceso de disecación de probetas de relave saturadas. Araya hizo uso de iluminación activa, a través del uso de láser, e iluminación pasiva, otorgada por la luz natural del ambiente. El autor utiliza además una paleta Macbeth ColorChecker para normalizar la reflexión de luz frente a las variaciones de luz solar entre distintos días, además de la normalización de los resultados por la reflexión de luz medida en el estado seco de manera de poder comparar los resultados obtenidos entre una prueba y otra. En lo investigado por Araya se demuestra que existe relación entre el contenido de humedad y la reflexión de luz, la que permitió, en conjunto con el uso de NDVI, estimar de manera aproximada la humedad en depósitos de relaves. Esta investigación es el primer acercamiento de monitoreo de humedad en depósitos de minería tradicional, por lo que las posibilidades de investigación e innovación son amplias.

3.6. Relaves

Los relaves corresponden a residuos provenientes de la extracción de minerales en yacimientos mineros, los cuales consisten en una mezcla de material sólido y cierto contenido de humedad formando una mezcla llamada pulpa. El comportamiento y las propiedades del relave dependerán de la razón de agua y sólidos, como también de las características de las partículas sólidas (Ramírez, 2007). El comportamiento del relave influirá en la técnica de deshidratación, transporte y depositación, además del tipo de depósito que se proyecte.

Los mecanismos de deshidratación, transporte, depositación y almacenamiento son descritos a continuación.

3.6.1 Deshidratación, transporte y depositación

Tradicionalmente, los relaves se han transportado y colocado en depósitos en calidad de slurry, dada su facilidad de bombeo desde la planta de procesamiento hasta el depósito. El relave en calidad de slurry se ha caracterizado por poseer concentración de sólidos que varía entre 40% a 50%, el cual es transportado hidráulicamente para luego ser colocado en la playa de relaves. En general los relaves van asentando sus partículas sólidas a medida que el relave atraviesa la cubeta, donde el agua puede infiltrarse, evaporarse o almacenarse en la laguna de aguas claras, donde posteriormente puede ser recuperada a través de bombeo y retransportada a la planta de procesos para su reutilización.

En áreas donde el recurso hídrico es escaso o donde se desea generar una mayor estabilidad física de los depósitos, los relaves se pueden deshidratar, a través del espesado o filtrado, de manera de aumentar su concentración de sólidos. Por lo general las concentraciones de sólidos para relaves espesados, están entre el 55% y el 67%, y si se espesan hasta formar una pasta, la concentración de sólidos alcanza entre los 67% a los 75% de sólidos, mientras que los relaves con mayor deshidratación corresponden a los relaves filtrados, los cuales pueden

exceder el 75% de concentración de sólidos. Estos tipos de relaves son más complejos de bombear, por lo que su transporte requiere de consideraciones particulares respecto a los relaves en calidad de slurry, como por ejemplo el uso de camiones o cintas transportadoras.

Las propiedades geotécnicas de los relaves depositados generalmente mejoran a medida que la concentración de sólidos aumenta, las cuales dependen de la densidad seca, el contenido de humedad y la relación de vacíos de los relaves. Por ejemplo, los relaves espesados, aunque son más costosos de producir y transportar que los relaves convencionales, se utilizan cada vez más debido a sus propiedades geotécnicas superiores y a su buen desempeño ambiental, reduciendo el consumo de agua en su transporte y depositación.

A continuación, se describen los procesos de deshidratación y transporte asociados al contenido de sólidos de los relaves.

3.6.1.1 Deshidratación; Espesadores y filtradores

En la planta de procesos, previo a ser transportados a los depósitos, los relaves son sometidos a técnicas de deshidratación las cuales pueden ser a través principalmente de espesadores y filtradores, entre otros. Algunos de ellos se explican a continuación.

- **Espesadores:** Los espesadores son grandes tanques con fondos cónicos o cilíndricos que permiten que los materiales sólidos del relave entrante se asienten en el fondo del estanque, concentrando el material y permitiendo que el agua se desplace por la parte superior con la ayuda de floculadores y rastrillos giratorios mecánicos. El material denso que se concentra en el fondo se le llama underflow, y es el que posteriormente será transportado al depósito, mientras que el agua se concentra por sobre el relave y es llamada overflow, la cual es recuperada para ser reutilizada en las instalaciones de deshidratación, y en algunos casos puede ser tratada para devolverla al ambiente, aunque no es lo común. Un esquema de los espesadores es mostrado en Fig. 3-9, donde se muestra la alimentación del espesador y sus correspondientes salidas.

Respecto a la definición, se puede decir que los depósitos de relave también corresponden a espesadores, con la diferencia que existen variables desconocidas en los depósitos, tales como fenómenos de precipitación, filtraciones, evaporación, entre otras, que hacen que el sistema de deshidratación sea menos predecible que el que entregan los espesadores convencionales. Por otro lado, cualquier cambio en la humedad del material de entrada del espesador, influirá posteriormente en el proceso transporte hasta el depósito y sedimentación estando en el depósito, por lo que se deben tomar acciones paliativas durante la operación de manera de reducir las variaciones en la concentración de sólidos del material de salida, tales como reajustar las tazas de floculante, recircular el material sedimentado, entre otras.

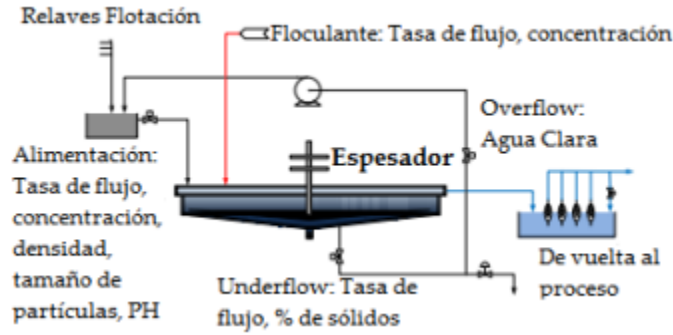


Fig. 3-9: Esquema de espesador.
Fuente: Zuzunaga (2018)

Los espesadores tienen limitaciones prácticas en cuanto la capacidad máxima de deshidratación y con ello su comportamiento reológico asociado, lo cual depende del tipo de espesador y del mineral del relave. Valores típicos de concentración de sólidos y de yield stress en función del origen del relave se muestran en Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Capacidad máxima de deshidratación de relaves en espesadores.
Fuente: Manual de diseño de depósitos de relaves Golder (2015).

Tipo de relave	Concentración de sólidos en underflow [%]	Yield stress [Pa]
Relave de cobre	55-68	10
Relave de oro	60-70	5
Relave de níquel	58-65	32
Relave de petróleo	45-46	23-95

- **Filtradores:** Los filtradores son otro medio mecánico para deshidratar el material, el que normalmente es utilizado en conjunto con el espesador, ya que el material de salida del espesador se utiliza como material de ingreso del filtrador, el cual aumenta la concentración de sólidos entregando una consistencia de “torta”, la que es llevada posteriormente por cintas transportadoras o camiones, en vez del sistema tradicional de bombeo por tuberías.

Al igual que en el caso de espesadores, existen distintos tipos de filtros y su elección depende principalmente de la mineralogía del relave, del contenido de finos y de la concentración de sólidos deseada. En Fig. 3-10 se presenta un esquema general de un filtrador, donde se muestra que el relave gira en una cinta, donde un sistema de vacío se encarga de extraer el agua del material, el que es “raspado” de la cinta para repetir el proceso.

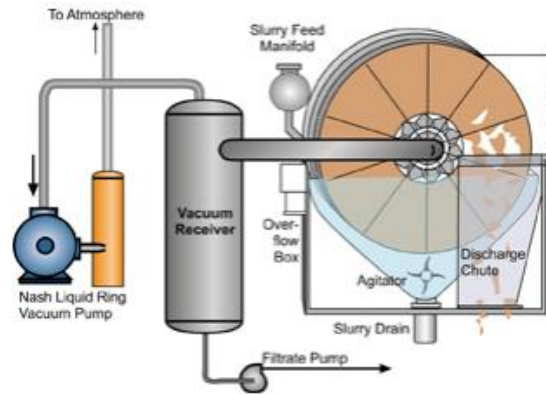


Fig. 3-10: Esquema de Filtrador

Fuente: Manual de diseño de depósitos de relaves Golder (2015).

- Otros mecanismos de deshidratación: Existen otros métodos de deshidratación, tales como grupos de hidrociclones, y en menor medida y recientemente explorando el uso de centrifugas y electrocinética.

3.6.1.2 Transporte: Bombeo, cintas transportadoras, camiones.

Una vez se tiene el relave en la concentración de sólidos deseada, se debe transportar hasta el depósito de relaves, procedimiento que dependerá, entre otras cosas, del tipo de relave, es decir, de la concentración de sólidos a la que se encuentre el material. Para ello comúnmente es utilizado el sistema de bombeo, pero mientras más densa sea la pulpa, va surgiendo la necesidad de utilizar otros mecanismos, como lo son las cintas transportadoras o camiones. Estos procedimientos se describen a continuación.

- Bombeo: Los sistemas de bombeo son los mecanismos más comunes de transporte de relaves. Su diseño se enfoca principalmente, como cualquier sistema de impulsión, a la selección de la bomba y tubería adecuada para transportar el relave hasta el depósito. Uno de los principales factores que influyen en el transporte son las características reológicas del relave, las que están influenciadas por el contenido de sólidos, en donde a mayor contenido de sólidos, mayor será el yield stress, por lo que el sistema de bombeo no es apto para altos contenido de sólidos, dado que el relave deja de tener un comportamiento newtoniano y su bombeo se dificulta.

Para que el relave sea transportado por tuberías, se debe diseñar el sistema para que el material sea un fluido newtoniano con un flujo del tipo plug (velocidad constante en toda la sección), por lo que conocer el contenido de finos, dentro de otras variables, es fundamental para su correcto transporte.

Uno de los criterios importantes en el transporte es la velocidad de flujo, dado que existe un límite inferior, para que no segregue el material, y un límite superior, para no erosionar las tuberías. Para el relave tipo slurry, es más importante la velocidad mínima, dada que es más propenso sedimentar, mientras que, a mayor contenido de sólidos, la velocidad máxima toma mayor importancia dado que al poseer más

cantidad de sólidos, genera mayor erosión en las paredes de la tubería. Para relaves tipo slurry las velocidades típicas de transporte son 1.5-2.5 m/s, mientras que en pasta se reducen a 0.6-1.0 m/s.

En Fig. 3-11 se muestra un sistema de bombas desde la planta procesadora, y la tubería por la que fluye el relave.



Fig. 3-11: A la izquierda el sistema de bombas, a la derecha la tubería que transporta el relave.
Fuente: Zuzunaga (2018).

- Cinta transportadora: Los relaves que han sido filtrados resultan en materiales tipo torta, el cual no es posible transportar a través de tuberías, ya que el contenido de humedad en el relave provoca que no sea factible bombearlos. Estos materiales se trabajan como material seco, sin embargo, si tienen un contenido de humedad que bordea del 10-20%. Por lo tanto, en estos casos el relave puede ser conducido a los depósitos por cintas transportadoras, como la que se muestra en Fig. 3-12.



Fig. 3-12: Cinta transportadora de relaves filtrados.
Fuente: Zuzunaga (2018).

El contenido de humedad influye en el transporte del material en la cinta, ya que una torta más seca generará problemas de acumulación de polvo, una torta húmeda puede deslizarse fuera de la cinta, mientras que una torta viscosa puede adherirse a la banda, por lo que el control del contenido de humedad permitirá la correcta operación de la cinta. Por otro lado, se suma a estos problemas la vibración de la cinta, la cual puede inducir problemas de sedimentación del material, generando el derrame del agua y del relave, pudiendo producir daños ambientales.

- Camiones: Otro método de transporte para los relaves tipo torta son los camiones, los cuales reciben el material desde los filtradores para ser transportados y posteriormente situados en el depósito. Al igual que en las cintas transportadoras, la verificación del contenido de humedad es relevante dada que las vibraciones pueden generar fugas del camión y segregación del material, por lo que previo al depósito deben ser remezclado para asegurar su homogeneidad, como también se pueden producir problemas asociados a relaves que se encuentren muy secos, los que pueden emanar polvo contaminante al entorno.

3.6.1.3 Métodos de depositación:

Una vez que el relave ha sido transportado, debe ser situado en el depósito, y para ello existen métodos hidráulicos, para los relaves con mayor contenido de humedad (slurry, espesado), los que corresponden a cicloneo, paddock y spigot, los que se detallan a continuación.

- Spigot: Es un sistema de depositación a través de múltiples salidas de grifo a lo largo de la tubería de entrega, cuyas salidas poseen tuberías que se apoyan en el muro y que poseen salidas que permiten que el relave salga a distintas alturas, lo que genera que el relave se segregue más fácilmente, dejando la fracción más gruesa cerca del muro. Además, los grifos son abiertos por secciones de manera de ir moviendo las zonas de depositación, y así no concentrar los relaves en un solo sector y general un perfil de cubeta uniforme. Este sistema de depositación permite disminuir la permeabilidad vertical y por tanto aumentar el flujo horizontal del agua. En Fig. 3-13 se presenta un ejemplo de la tubería de depositación y la salida de tubería desde los grifos.



Fig. 3-13: A la izquierda, la tubería de depositación, a la derecha, la salida de tubería desde el grifo.
Fuente: Manual de diseño de depósitos de relaves Golder (2015).

- **Ciclonaje:** Un ciclón es un dispositivo que consta de un perfil cónico que conecta con una tubería de alimentación que ingresa tangencialmente al cono en la parte de mayor diámetro, y otro tubo que entra por la parte superior en el eje del cono. El relave ingresa por la entrada tangencial, el que es sometido a un giro que genera que los finos y la mayor cantidad de agua se vayan al eje central y salgan por el tubo central, mientras que la fracción gruesa se vaya hacía el fondo del cono. En Fig. 3-14 se muestra un esquema del funcionamiento del sistema de ciclonaje, donde se muestra que la fracción gruesa es separada de los finos, la cual es utilizada para formar el muro con material de buenas características geotécnicas.

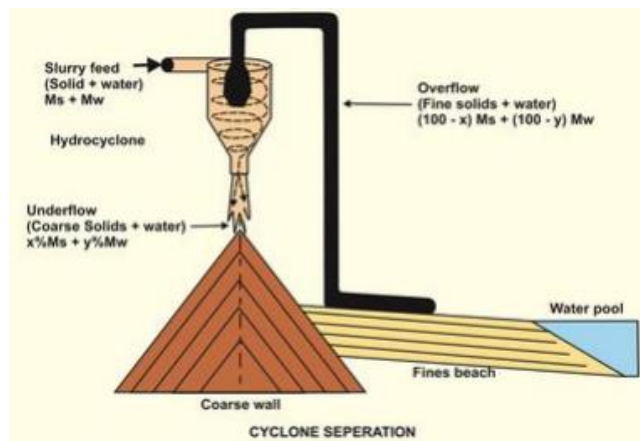


Fig. 3-14: Esquema de operación de ciclón.
Fuente: Manual de diseño de depósitos de relaves Golder (2015).

- **Paddock o daywall:** La aplicación de esta técnica es útil cuando no es posible obtener una revancha del muro. Los motivos pueden ser: la granulometría uniforme del relave que genera una cubeta plana; la longitud de la cubeta no es suficiente para desarrollar una revancha; o cuando el relave tiene gravedad específica muy alta, lo que genera una acumulación de material por la rápida sedimentación.

Consiste en generar cercos perimetrales que van creciendo aguas arriba, los que permitan contener el relave en su interior, el cual es depositado a través de tuberías que pueden ser dispuestas en los muros o en la misma cubeta, como se muestra en Fig. 3-15.

El relave es depositado en calidad de slurry con un contenido de sólidos que varía entre 30% a 50%, los cuales, al ser depositados, comienzan a escurrir y asentar las partículas de fracción más gruesa, formándose una capa de aguas claras superficial, la cual es drenada o bombeada, dando paso al secado del relave, debido a la infiltración y evaporación, lo que provoca el inicio del agrietamiento de la superficie. Para una adecuada consolidación de los relaves, se van disponiendo capas de no más de 200 mm, lo que asegura una superficie estable físicamente para el desarrollo del depósito, el cual va creciendo aguas arriba.



Fig. 3-15: Descarga de relave en método Paddock.

Fuente: Zuzunaga (2018).

Los cercos perimetrales se realizan mediante excavadora, zanjadoras o manual, los que requieren que la superficie esté a bajos contenidos de humedad, de lo contrario no es posible ingresar la maquinaria ni mucho menos personal.

3.6.1.4 Tipos de depósitos de relave

- **Tranque de relaves:** Corresponden a estructuras que disponen de muros perimetrales compuestos por la fracción más gruesa de los relaves, obtenida mediante el uso de hidrociclones, el cual separa la fracción gruesa del relave integral para la construcción del muro, mientras que la parte más fina, llamada lamas, pasa a ser depositada en el tranque, en la zona denominada cubeta. Este tipo de relaves es llamado “slurry”, el cual posee un contenido de finos del orden del 30%, y altos contenidos de agua (alrededor de 60%). En Fig. 3-16 se muestra un ejemplo de tranque de relaves correspondientes al depósito “El Torito”, ubicado en la comuna de Nogales de la región de Valparaíso.



Fig. 3-16: Tranque de relaves El Torito.
Fuente: Diario El Observador.

Los tranques de relaves es posible construirlos a través de tres métodos principales; Método de aguas arribas, método de eje central y método de aguas abajo. Actualmente (Decreto Supremo N° 248, 2007) no permite el método de aguas arriba, ya que, a pesar de ser beneficioso económicamente dado la menor cantidad de material que necesita respecto al resto de los métodos, posee menor estabilidad física.

El método de construcción de eje central consta de colocar un muro inicial compactado de empréstito, y sobre el mismo eje ir aumentando el coronamiento del muro inicial por etapas de crecimiento con el material grueso del relave. Por otro lado, el método de construcción de aguas abajo parte con el mismo procedimiento, sin embargo, el eje del muro va desplazándose aguas abajo, utilizando mayor material, pero entregando una mayor estabilidad al talud. Esta situación se ve esquematizada en Fig. 3-17, en donde se presentan los tres métodos constructivos.

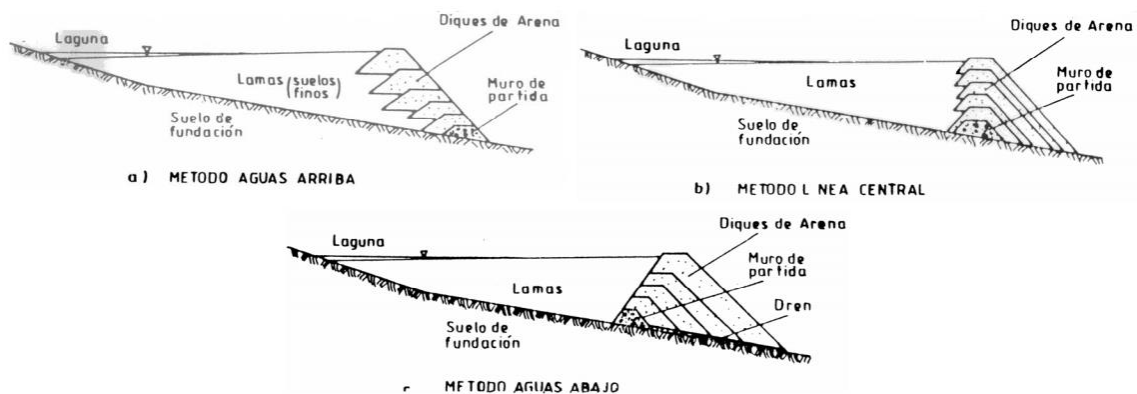


Fig. 3-17: Métodos constructivos en tranques de relaves.
Fuente: Ramirez, 2007.

- Embalse de relaves: Tipos de depósitos similar a los tranques de relaves, con la diferencia principal que el muro es construido íntegramente de material empréstito compactado, por lo que el relave integral es depositado en la cubeta, también en

calidad de “slurry”, con alto contenido de agua, rondando el 60%. Además, se impermeabiliza el coronamiento del muro y el talud interno. También se les llama embalses de relaves a aquellos construidos en depresiones de terreno en que no se requiere muro de contención. Un ejemplo de Embalse de relaves es el mostrado en Fig. 3-18, correspondiente al embalse Caren ubicado en la comuna Alhue en la región Metropolitana.



Fig. 3-18: Embalse de relaves “Caren”.
Fuente: Portal Codelco.

- Depósito de relaves espesados: Este tipo de depósitos almacena relaves que han sido previamente sometidos a procesos de sedimentación, mediante espesadores los cuales eliminan gran parte del agua que contiene la pulpa, dejándolos con contenidos de humedad cercanos al 40%, lo que genera una mayor densidad de depositación y por tanto los hace estructuras más estables que los tranques y embalses por lo que no necesitan de un muro. El depósito se realiza de forma cónica el cual es bordeado por un terraplén que sirve de contención en caso de que ya sea la pulpa o el agua, sobrepase el alcance de diseño. Un ejemplo de estos depósitos se muestra en Fig. 3-19, correspondiente a depósito Esperanza ubicado en Sierra Gorda en la región de Antofagasta.



Fig. 3-19: Depósito de relaves espesados “Esperanza”.
Fuente: SRK Consulting.

- Depósito de relaves en pasta: Este tipo de depósitos presenta una situación intermedia entre relaves espesados y relaves filtrados, con pulpas que poseen entre un 10% y 25% de agua, conteniendo partículas finas con tamaño menor a 20 μm , y densidades similares a las de pulpas de alta densidad. El proceso de depositación es similar al

efectuado en relaves filtrados, sin necesidad de compactación. Un ejemplo de estos depósitos es Delta, ubicado en Ovalle, región de Coquimbo, mostrado en Fig. 3-20.



Fig. 3-20: Depósito de relaves en pasta “Delta”.
Fuente: Portal Enami.

- Depósito de relaves filtrados: Este tipo de depósitos almacenan relaves que previamente son sometidos a procesos de filtración, donde se asegura que la humedad de la pulpa sea menor al 20%. Un ejemplo de estos depósitos es Rahco en Copiapó, región de Atacama, mostrado en Fig. 3-21.



Fig. 3-21: Depósito de relaves filtrado “Rahco”.
Fuente: Portal Consejo Minero.

3.6.1.5 Influencia de la humedad en depósitos de relaves

La humedad gravimétrica ($w\%$) en suelos se define como el cociente entre el peso del agua intersticial y el peso de las partículas sólidas (NCh1515.Of79, 1999), la cual se determina mediante la Nch1515. En relaves el procedimiento es exactamente el mismo, sin embargo, dada las dificultades para ser controlada el contenido de agua, no es algo que se haga habitualmente, pero como se verá a continuación, la humedad está presente en relaves desde que se deshidrata hasta que se deposita, afectando el comportamiento del residuo.

La pulpa de relave siempre es depositada con cierto contenido de humedad que varían en función del tipo de depósito que se haya proyectado. Una vez depositado el relave sufre fenómenos que reducen su contenido de humedad, donde al ir escurriendo por la cubeta, la fracción gruesa del relave comienza a asentarse dado el peso de las partículas, el cual genera una separación de la fracción gruesa de la fina y la formación de una capa de agua por sobre el material. Parte del agua comienza a escurrir hacia las partes bajas del depósito, almacenándose en la laguna de aguas claras, otra fracción es infiltrada, y otra es evaporada.

Los procesos de infiltración y evaporación generan que el relave continúe perdiendo contenido de humedad y reduciendo su volumen, dando paso a la consolidación del relave, proceso que depende del tiempo, y cuya reducción del contenido de humedad genera el aumento de las tensiones efectivas, dada la disipación del exceso de presión de poros, pasando de un material saturado a uno parcialmente saturado. La parcialidad de saturación genera succión intersticial entre las porosidades del relave, la cual va aumentando con la pérdida del contenido de humedad, donde inicia el proceso de agrietamiento del relave, continuando con la reducción del volumen del relave hasta alcanzar el contenido de humedad igual al límite de contracción, donde la reducción de la humedad no generará una variación en su volumen.

La evaporación corresponde al fenómeno físico por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso (vapor) producto de altas temperaturas. En relaves, este fenómeno se ve influenciado por el espesor de capas, la geometría del depósito, la granulometría y el contenido de humedad de la pulpa (Simms et al., 2007). La evaporación incide en fenómenos como la iniciación del límite de contracción, afectando la colocación de capas en depósitos espesados, filtrados y en pasta, y en la evaluación del balance de aguas (Chapman et al., 2008).

El proceso de infiltración corresponde a la penetración del agua en el relave de forma descendente, llegando a capas inferiores que pueden o no estar a menor contenido de humedad. Este fenómeno puede afectar a la contaminación de napas subterráneas generando desastres ambientales para el entorno del depósito (Rivera, 2012). Una de las soluciones a estos inconvenientes es proyectar depósitos que almacenen pulpas con menor contenido de humedad, como lo son los relaves espesados. Por otro lado, para reducir infiltraciones hacia los muros del depósito, es necesario mantener alejada la laguna de aguas claras y controlar la dirección de escurrimiento de la pulpa, de lo contrario se pueden inducir erosiones y disminución en los esfuerzos efectivos producto de la saturación de los muros, lo que se traduce en inestabilidades físicas las que podrían conllevar al colapso de depósitos (Decreto Supremo N° 248, 2007).

Uno de los problemas asociados a la infiltración corresponde al drenaje ácido, el cual corresponde a un fenómeno de inestabilidad química en depósitos de relaves y se define como la oxidación de minerales presentes en relaves. Se forma a partir de la combinación de agua, oxígeno y mineral, como por ejemplo piritita (Fe_2S), que producen ácido sulfúrico (H_2SO_4) y hierro ferroso. Si el ácido generado logra niveles de pH bajo 3.5, puede lixiviar otros minerales pesados los cuales son tóxicos para el ecosistema y la población humana (SERNAGEOMIN, 2003).

La forma de evitar la inestabilidad química post cierre de depósitos se presenta de distintas alternativas, una de ellas es la inundación del depósito, lo que provoca una disminución de

la tasa de transferencia de oxígeno al relave, generando que el ácido posea un pH más alto del riesgoso. Por otro lado, una impermeabilización de la superficie del depósito impide la llegada de agua al relave, y por tanto interrumpiendo la reacción de los tres elementos (agua, oxígeno y mineral).

Por otro lado, una de las amenazas de inestabilidad física en los relaves asociadas a niveles de saturación alto en los relaves corresponde a la licuefacción, fenómeno que ocurre en relaves granulares saturados, frente a cargas rápidas, produciendo un aumento en la presión de poros y reduciendo la resistencia al corte producto de la pérdida de contacto entre partículas, ocasionando fallas de estabilidad de las estructuras (Casagrande, 1950). En relaves las zonas susceptibles a licuefacción se concentran principalmente en los muros de los tranques y embalses, los cuales están contruidos con arenas ciclonadas y material de empréstito, respectivamente, por lo que un monitoreo deficiente de la humedad puede llevar a infiltraciones de agua en muros causando la saturación y por tanto haciéndolos susceptibles a licuar frente a cargas sísmicas (Asenjo, 2010). Frente a esto, se ha evidenciado que conocer la humedad permite determinar la resistencia cíclica, la cual es mínima a niveles superiores al 95% de saturación, y se mantiene alta para saturación menor a 70% (Tsukamoto et al., 2014).

CAPÍTULO 4: Metodología

4.1. Caracterización de materiales

Para el desarrollo de la relación entre la reflexión de luz y contenido de humedad superficial, se utilizaron 4 muestras de relaves provenientes de la minería nacional, además de mezclas de suelo natural utilizando suelo granular y fino, muestras que se presentan en Fig. 4-1, y cuya información de procedencia se muestra en Tabla 4-1 para relaves y en Tabla 4-2 para las muestras de suelo.

Tabla 4-1: Origen de muestras de relaves.

Muestra	Origen Mineralógico	Tipo de Depósito	Tipo de Muestra
Relave 1	Hierro	En pasta	Integral
Relave 2	Cobre	En pasta	Integral
Relave 3	Oro	Tranque	Lama ciclona
Relave 4	Multimineral	Tranque	Arena ciclona

Tabla 4-2: Origen de muestras de suelo.

Muestra	Origen
Suelo 1	Arena de Ottawa
Suelo 2	Arcilla esmecítica



Fig. 4-1: Muestras de relave y suelo limpio utilizados en esta investigación.

Con el fin de conocer las propiedades de los materiales utilizados en la investigación se realiza la caracterización geotécnica, desarrollando los ensayos que se mencionan a continuación.

- Granulometría fracción gruesa (MC_V8_8.102.1).
- Granulometría fracción fina (ASTM D 7928).
- Límites líquido (Nch 1517/1 Of. 79).
- Límite plástico (Nch 1517/2 Of.79).
- Límite de contracción (Nc 1517/3 Of.79).
- Gravedad específica (ASTM D 854).
- Clasificación de suelos (ASTM D 2487).

Los resultados de la caracterización se muestran en Tabla 4-3 para las muestras de relaves y para las muestras de suelos. Para el caso de los límites de consistencia, se muestran los resultados de las muestras a las que fue posible obtener valores, de lo contrario se clasificaron como no plásticos (NP).

Tabla 4-3: Resultados de caracterización de las muestras de relave y suelo.

Muestra	Relave 1	Relave 2	Relave 3	Relave 4	Suelo 1	Suelo 2
Mineral de extracción	Hierro	Cobre	Oro	Multimineral	-	-
Clasificación ASTM	CL	ML	CH	SP	SP	CL
Contenido de finos [%]	85	73	98	30	0	100
Peso específico (Gs) [-]	3.02	2.75	2.80	2.71	2.65	2.80
Límite líquido (LL) [%]	24.8	-	64.8	-	-	48.5
Límite Plástico (LP) [%]	19.9	-	41.4	-	-	36.2
Límite de contracción (LC) [%]	19.2	-	37.3	-	-	35.2

Las curvas granulométricas obtenidas a través de método de tamizado e hidrómetro para las muestras de relave se presentan en Fig. 4-2, mientras que las curvas granulométricas de los suelos se encuentran en Fig. 4-3.

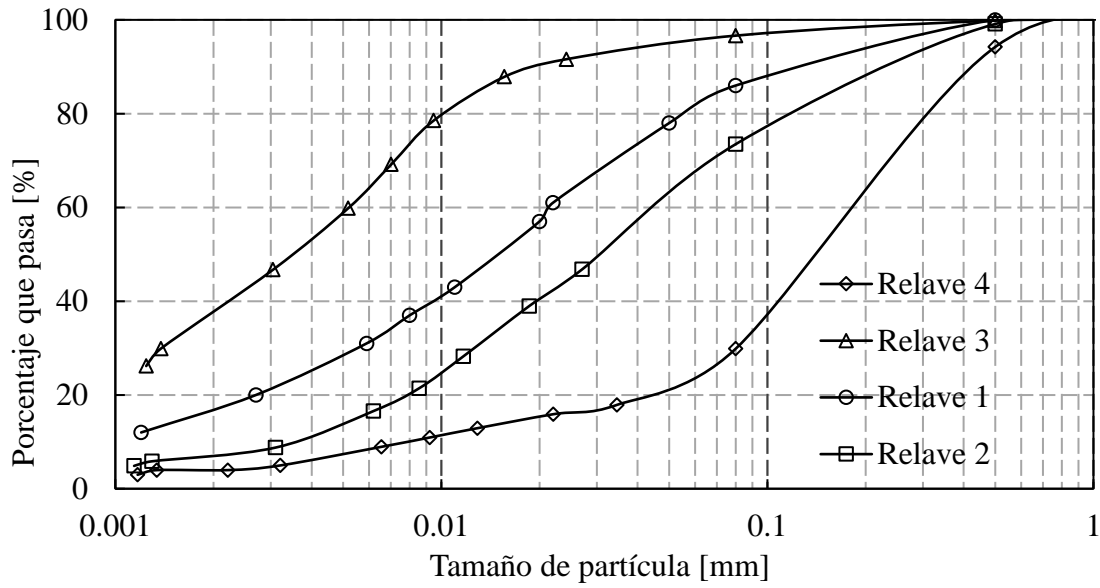


Fig. 4-2: Curvas granulométricas de muestras de relaves.

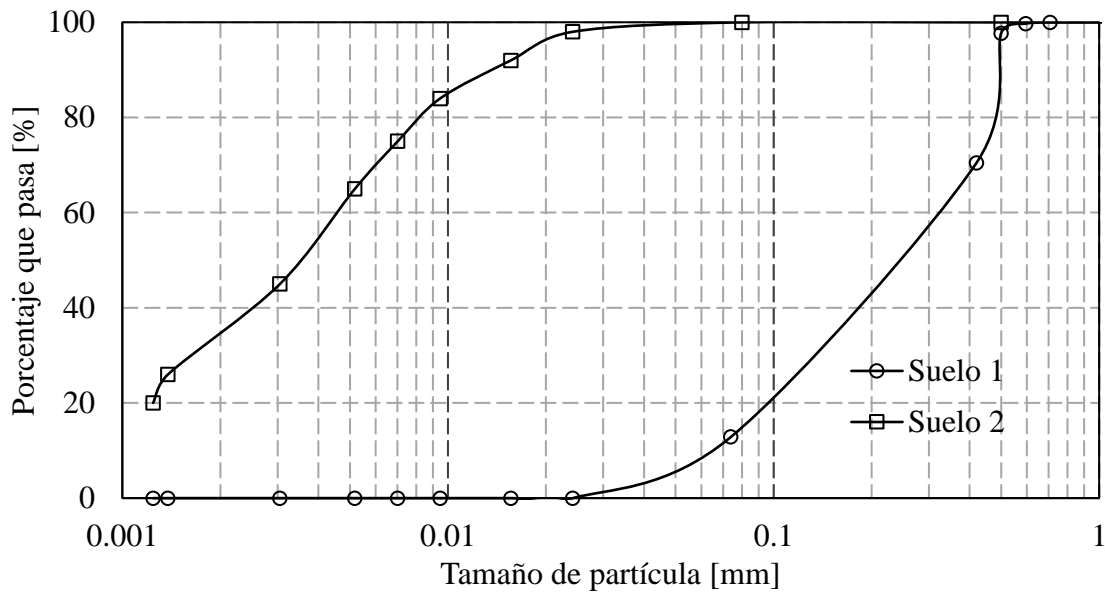


Fig. 4-3: Curvas granulométricas de muestras de suelos.

Adicionalmente, para el desarrollo de la investigación se evaluaron mezclas de suelo natural con la unión de suelo 1 y suelo 2, en proporciones que se muestran en Tabla 4-4, junto con su caracterización, mientras que en Fig. 4-4 se muestran las correspondientes curvas granulométricas.

Tabla 4-4: Resultados de caracterización de mezclas de Suelo 1 y Suelo 2.

Suelo	3	4	5
Clasificación ASTM	SC	SC	CL
Razón Suelo 2/ Suelo 1	1/3	1/1	3/1
Peso específico (Gs) [-]	2.69	2.72	2.76
Límite líquido (LL) [%]	-	-	33.2
Límite plástico (LP) [%]	-	-	25.2
Límite de contracción (LC) [%]	-	-	24.5

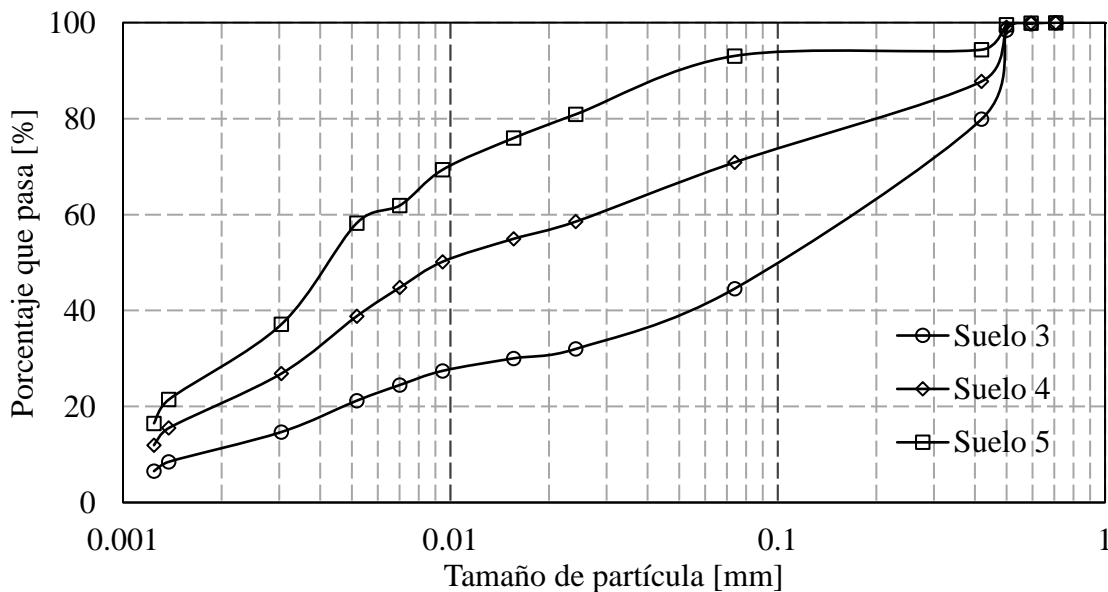


Fig. 4-4: Curvas granulométricas de mezclas de suelos.

4.2. Aparatos de ensayo

Para la investigación, se utilizaron dos cámaras multispectrales, una para el rango visible de la luz (VIS, 400nm a 700nm), y otra para el rango cercano al infrarrojo (NIR, 400 a 1100 nm), las cuales fueron controladas por mini procesadores Raspberry pi. Además del uso de

iluminación ambiental, se aplica iluminación activa proveniente de 7 láser a 405nm, 450nm, 520nm, 650nm, 780nm, 830nm y 980nm, con el fin de determinar la estimulación de luz óptima para el monitoreo de la humedad. Para el posicionamiento de los láseres se utilizó un servomotor que permitió ubicarlos siempre en la misma zona de la probeta. Para el control de la iluminación, se utiliza un sensor de luz, de forma de evaluar la variabilidad de la luz debido a efectos ambientales. La información captada por las cámaras es almacenada en los mini procesadores para luego ser analizado en un código en lenguaje Matlab de elaboración propia.

Las cámaras, el servomotor, los láseres y los mini procesadores se introdujeron en una caja de control la cual se muestra en Fig. 4-5, donde se presenta la vista general del setup, observándose que la caja de control es sostenida por el trípode dispuesto, mientras que sobre la caja se ubica el servomotor, el que a su vez está conectado a los dispositivos de control, correspondientes a mini procesadores Raspberry Pi, los que se encuentran dentro de la caja de control, los que además están conectados a las cámaras y láser dispuestos en la caja de control. Por otro lado, en Fig. 4-6 se muestra una vista en planta de la cara inferior de la caja de control, la cual contine dos cámaras y 7 láseres, los que son posicionadas en la zona de control que se indica en Fig. 4-6, a partir del servomotor, el cual genera el giro del cilindro plomo que se observa en la imagen, el que fue diseñado en el software Inventor e impreso por una impresora 3D.



Fig. 4-5: Setup experimental.

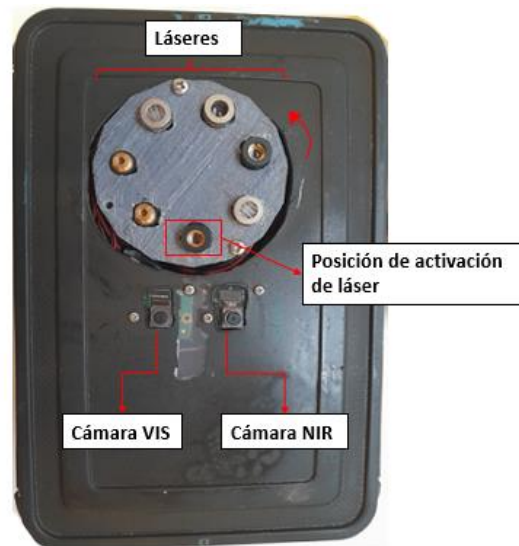


Fig. 4-6:Caja de control.

De esta forma, se ubica la caja de control de manera que las cámaras y láseres que están dentro queden perpendiculares a la probeta de relaves, las cuales son estimuladas con la iluminación activa provenientes de los láseres, lo que sólo se activan si se encuentran en la posición de control indicada en la Fig. 4-6. Una vez tomada la fotografía, el motor gira el cilindro, posicionando al siguiente láser para iluminar la probeta donde se vuelve a fotografiar, procedimiento que se repite hasta que todos los láseres hayan pasado por la posición de control.

A continuación, se detallan los componentes del setup experimental.

4.2.1 Cámaras multispectrales

Para la medición de reflexión de luz se utilizaron cámaras multispectrales modelos Picamera module V2, para el rango visible, y Picamera module NoIR, para el rango cercano al infrarrojo, ambas mostradas en Fig. 4-7, cuya ubicación se mostró en Fig. 4-6. Las cámaras se diferencian principalmente en los filtros que poseen, los que permiten captar reflexión de luz en distintas bandas espectrales, ya que para el caso del modelo NoIR, la cámara no cuenta con filtro infrarrojo, lo que permite captar la reflexión de luz en ese rango, mientras que el modelo V2 solo permite captar longitudes de onda en el rango visible.

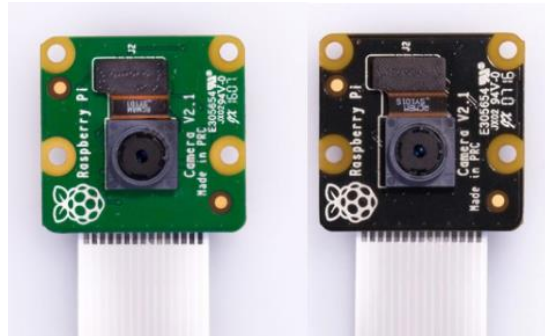


Fig. 4-7: Cámara multispectral en el rango visible (izquierda) y en el rango cercano al infrarrojo (derecha).

Para este trabajo las cámaras fueron configuradas en nitidez, contraste, brillo, saturación, ISO, compensación de exposición, modo de medición, velocidad de disparo y resolución de píxeles cuyo detalle se muestra en Tabla 4-5.

Tabla 4-5: Configuración de cámaras

Parámetro	Valor
Nitidez	0
Contraste	0
Brillo	50
Saturación	0
ISO	0
Composición de exposición	0
Modo de exposición	Auto
Modo de medición	Average
Velocidad de obturación	1/60
Resolución	3264x2448

4.2.2 Computador de control

Para el funcionamiento de las cámaras, láseres y servomotor, se utilizaron procesadores que permiten controlar y almacenar la información captada por los sensores. Para esto, se hace uso de dos miniprosesadores modelo Raspberry Pi 3 B V1.2, los cuales funcionan con sistema operativo Raspbian y 1 GB de RAM y 16 GB de memoria externa.

Estos procesadores permiten conectar los elementos que se encuentran en la caja de control, y ser controlados por códigos que son incorporados en el sistema operativo, lo que a su vez

4.2.3 Iluminación activa

Como iluminación activa (artificial) se utilizaron 7 láser en el rango visible y cercano al infrarrojo, de 405 nm, 450 nm, 520 nm, 650 nm, 780 nm, 830 nm y 980 nm, con 50 mW de potencia, cuya intensidad es mostrada en Fig. 4-8. Cada láser fue regulado a través de circuitos compuestos por potenciómetros de 100 Ω , capacitores de 100 nF, resistencias de 220 Ω , transistores PN2222a y diodos IN4007, cuya distribución se muestra en Fig. 4-9, considerando que existe un circuito por láser, mientras que la conexión realizada para cada uno de los láseres se muestra en Fig. 4-10, donde se presenta la distribución de los componentes utilizados.



Fig. 4-8: Iluminación de láser.

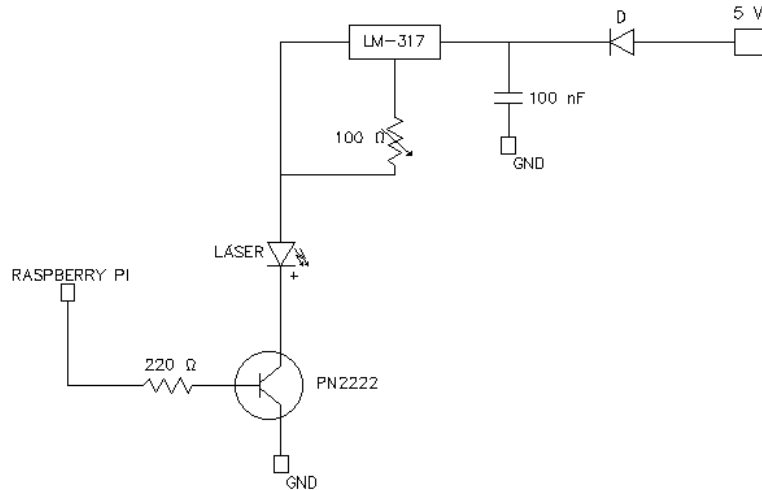


Fig. 4-9: Circuito de alimentación de láser.

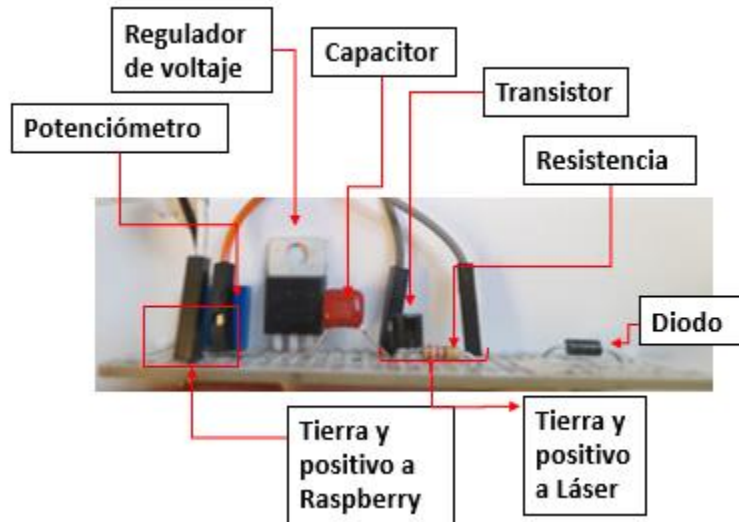


Fig. 4-10: circuito de conexión de láseres y mini procesador Raspberry pi.

4.2.4 Servomotor

Para lograr que cada láser apunte en la misma posición al momento de captar la reflexión de luz, se utiliza un servomotor de posicionamiento de 360°, el cual es alimentado de energía directamente desde el procesador Raspberry pi. El motor se ubica sobre la caja de control (Fig. 4-5), el cual es conectado al cilindro que contiene los láseres, el que, a través de un código, permite posicionar cada uno de los láseres en la ubicación de control.

4.2.5 Software de visualización

Para poder visualizar los miniprosesadores se utilizan dos métodos. El primero es a través del software PuTTY, el cual entrega una interfaz en líneas de comandos, muy similar a lo que se muestra en cualquier software de programación. La segunda forma de visualización es mediante el software VNC Viewer, el cual muestra el escritorio remoto de la computadora, y es igual a la visualización al encender una computadora comercial. La interfaz de PuTTY corresponde a líneas de comando, mientras que VNC Viewer equivale al interfaz regular de cualquier computadora.

Para controlar el ensayo se hace mediante el software PuTTY ya que posee una mayor velocidad de procesamiento dado su gráfica más sencilla, mientras que para la visualización de imágenes se utiliza el software VNC Viewer.

Por otro lado, para el desarrollo de los códigos que permiten ejecutar las cámaras, laser y motor se hace uso del software Python, el cual es ejecutado por los miniprosesadores y por computadores de escritorio.

4.3. Preparación de muestras

Los ensayos fueron realizados en el laboratorio de Geotecnia de la UTFSM, en donde se prepararon probetas de las muestras en moldes cilíndricos de 7.5cm de diámetro y 2.3cm de altura, con una base que facilita la manipulación de 13cmx13cm, tal como se muestra esquemáticamente en Fig. 4-11, mientras que una imagen real es presentada en Fig. 4-12.

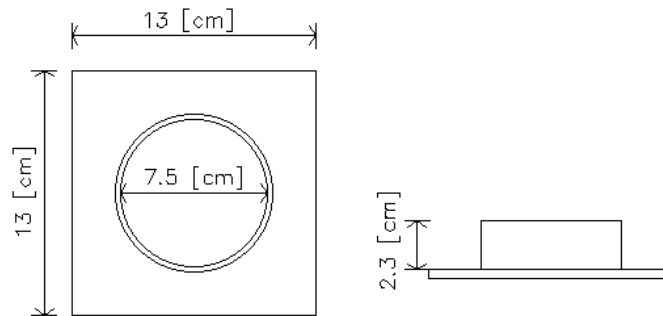


Fig. 4-11: Esquema de molde de probetas.



Fig. 4-12: Probeta de relave.

4.3.1 Tramos de humedad

La preparación de probetas se divide en dos tramos: el primero corresponde a un rango desde la humedad de saturación (w_{sat}) hasta el estado seco (Tramo A), y el segundo en el rango de dos veces la humedad de saturación hasta la humedad de saturación (Tramo B). De esta forma se dividen los ensayos en muestra sin capa de agua superficial (Tramo A), y muestra con capa de agua superficial (Tramo B).

El procedimiento se realiza mezclando muestras en estado seco, con el correspondiente contenido de humedad mezclado de forma manual en pailas. Las humedades de saturación para cada uno de los materiales se muestran en Tabla 4-6. Las mezclas saturadas fueron depositadas en las probetas en capas homogéneas de 1.15cm, las cuales solo son compactadas por peso propio.

Tabla 4-6: Humedad de saturación de las muestras.

Muestra	Relave 1	Relave 2	Relave 3	Relave 4	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3	Suelo 4	Suelo 5
Humedad de saturación (Wsat) [%]	35.3	25.6	94.0	30.8	13.5	67.3	19.8	31.4	54.6

4.3.2 Tramos de densidad

Para evaluar la influencia en la respuesta de la densidad de las mezclas, se utilizó la muestra de relave 1 para realizar el ensayo a distintos niveles de densidad. Las densidades secas evaluadas corresponden a 1.31gr/cc, 1.56 gr/cc, 1.67 gr/cc y 1.72 gr/cc, las cuales fueron evaluadas en el Tramo A de humedad comentado anteriormente.

4.3.3 Variación de contenido de finos

Para identificar el efecto del contenido de finos en la respuesta, se preparan muestras de Relave 1, Relave 2 y mezclas de suelo natural formadas por Suelo 1 y Suelo 2, a distinto contenido de finos en un rango entre 0% y 100%. En este caso, el rango de humedad evaluado fue el tramo A.

Para poder realizar las mezclas, se utilizó el tamiz N°200 para separar la fracción fina de la gruesa de cada una de las muestras de relave. La proporción de finos de las mezclas y la mezcla de suelo natural se muestran en Tabla 4-7.

Tabla 4-7: Composición de mezclas de muestras de relaves y suelos.

Muestra\ Mezcla	1	2	3	4	5
Relave 1	0% finos	25% finos	50% finos	Relave 1	100% finos
Relave 2	0% finos	25% finos	Relave 2	75% finos	100% finos
Suelo 1 y Suelo 2	Suelo 1	Suelo 2	25% suelo 2	50% suelo 2	75% suelo 2

4.4. Desarrollo de ensayos

Por cada medición, se toman seis fotografías por cámara, tres con iluminación láser y tres sin láser, con el fin de controlar errores de medición, y poder eliminar valores alterados. Una vez almacenadas las 12 fotografías, se registra la intensidad de luz captada por el sensor de luz. Luego, se toma la muestra y se pesa en la balanza, registrando la masa con precisión del miligramo (Wi).

Posterior a la medición, se introduce la probeta al horno a una temperatura de 100°C , durante 10 minutos, para luego extraer y dejar temperar por otros 10 minutos más, donde luego se compara la intensidad de luz captada por el sensor, respecto la prueba anterior, la cual debe cumplir con la restricción de variación de ± 20 lux. Una vez cumplido lo anterior, se pesa la probeta y se repite el procedimiento de secado. Las mediciones continúan hasta que la diferencia de masa entre un ciclo y otro sea menor a 0.01gr . Con posterioridad se deja la probeta por 24 horas en horno a 100°C , para luego reposar por 2 horas a temperatura ambiente. Seguido, se toman las últimas fotografías, y se pesa por última vez la probeta. Esto se considera como la masa seca del relave (W_s). Finalmente se extraen todas las imágenes, las cuales se asocian a un contenido de humedad, calculado según Nch1515, generando un set de imágenes como se presenta en Fig. 4-13.



Fig. 4-13: Imágenes de sección de probeta desde un estado saturado (izquierda), hasta el estado seco (derecha).

Las imágenes son procesadas por un código ejecutable en el software Matlab, diseñado para extraer la intensidad de luz captada por cada imagen, desde el cual se obtiene la intensidad de luz normalizada ($I_{Ti}(C)$), y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) como se muestra en el acápite siguiente.

4.5. Procesamiento de imágenes

Para el procesamiento de imágenes se selecciona un tramo homogéneo de la imagen con un total de n píxeles, tal como se observa en Fig. 4-14. De este rectángulo se obtiene el índice de intensidad total espectral $I_{ii(NIR,VIS)}(C)$ para cada canal (R, G, B), correspondiente al promedio de intensidad de luz, como se muestra en Ec. (4.1).

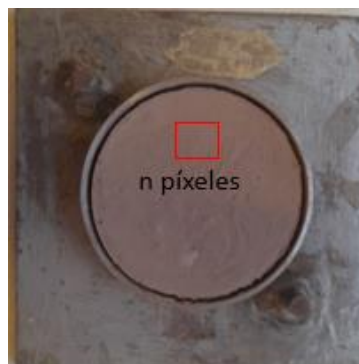


Fig. 4-14: Probeta con sección rectangular homogénea.

$$I_{ti(NIR,VIS)}(C) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (C) \quad (Ec. 4.1)$$

Dado que las mediciones son realizadas a distintas horas del día, la intensidad de luz ambiental varía de una imagen a otra. Para eliminar este efecto, la intensidad obtenida en la imagen NIR sin iluminación artificial $I_{ti(NIR)}(C)(NON \text{ LASER})$, es restada a la intensidad de luz obtenida en la imagen con iluminación artificial $I_{ti(NIR)}(C)(LASER)$, como se muestra en Ec. (4.2).

$$I_{ti}(C) = I_{ti(NIR)}(C)(LASER) - I_{ti(NIR)}(C)(NON - LASER) \quad (Ec. 4.2)$$

Para estandarizar los resultados, la intensidad de luz obtenida en cada medición $I_{ti}(C)$, fue normalizada por la intensidad de luz obtenida para la condición seca $I_{tn}(C)$ como se muestra en Ec.(4.3), siguiendo un procedimiento similar a lo planteado por (Weidong et al., 2003) para la estimación de humedad en suelos a partir de reflexión de luz. De esta manera se obtiene la intensidad de luz total para la condición de humedad i . Finalmente, se calcula el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), usando Ec.(4.4).

$$I_{Ti}(C) = \frac{I_{ti}(C)}{I_{tn}(C)} \quad Ec. (4.3)$$

$$NDVI_i(C) = \frac{I_{i,NIR} - I_{i,VIS}}{I_{i,NIR} + I_{i,VIS}} \quad (Ec. 4.4)$$

4.6. Plan de trabajo

Para cada tipo de ensayo, se evaluaron 4 probetas. El primer tipo de ensayo realizado fue a los 4 relaves, evaluados en el Tramo A, aplicando los 7 láser mencionados. A partir de esto, se selecciona el láser que entrega mejores resultados, con el fin de optimizar el desarrollo en laboratorio. Luego, con el láser seleccionado, se evalúa para los 4 relaves el Tramo B de humedad. Posteriormente, se realizan ensayos en paralelo correspondientes a; Relave 1 en Tramo A de humedad en los rangos de densidad de 1.31 gr/cc- 1.72 gr/cc; Tramo A de humedad a las mezclas de Relave 1, Relave 2, Suelo 1 y Suelo 2 mencionadas en 4.3.3. Finalmente, se realiza una verificación de las curvas obtenidas por cada método, repitiendo los ensayos para la evaluación de humedad.

Para una mejor comprensión de las etapas, se muestra en Fig. 4-15 un diagrama con el orden de los ensayos.

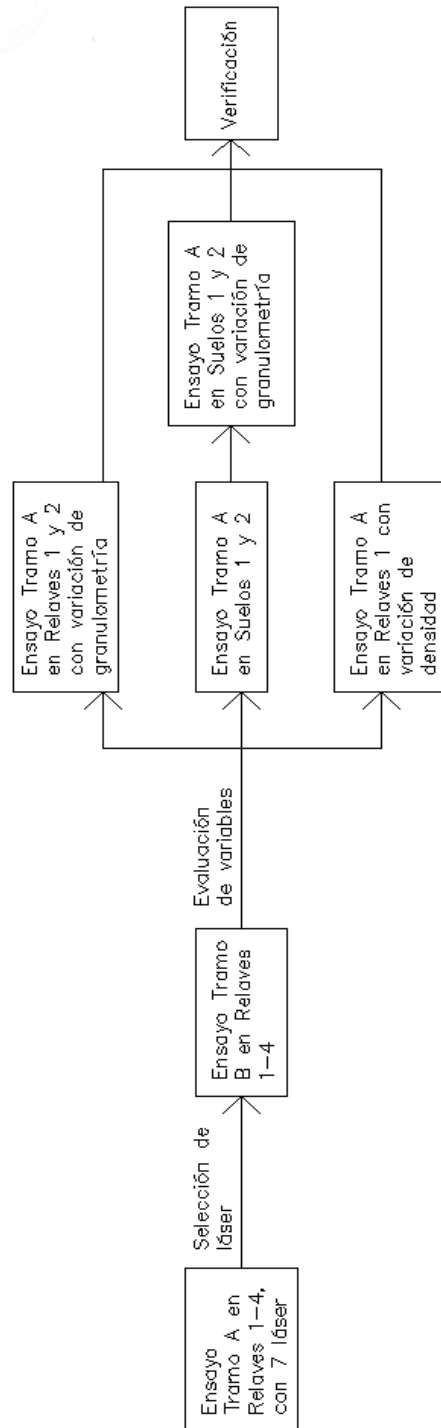


Fig. 4-15: Diagrama de ensayos a realizar.

CAPÍTULO 5: Resultados

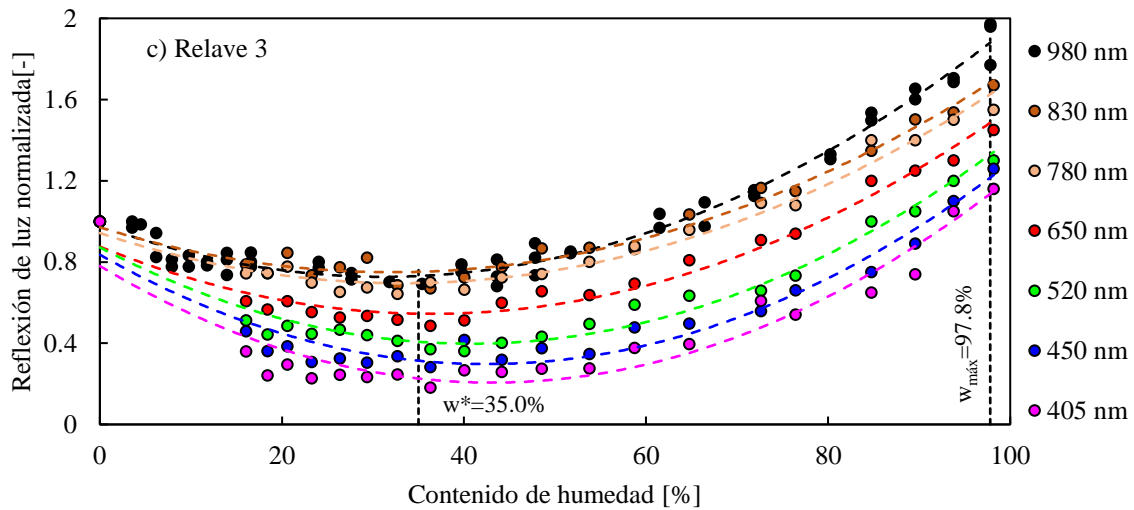
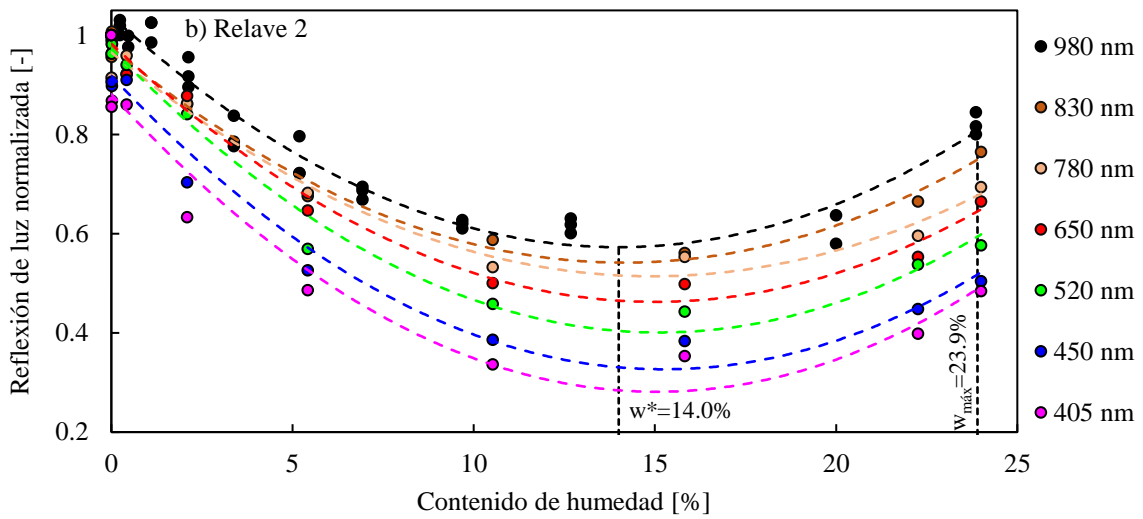
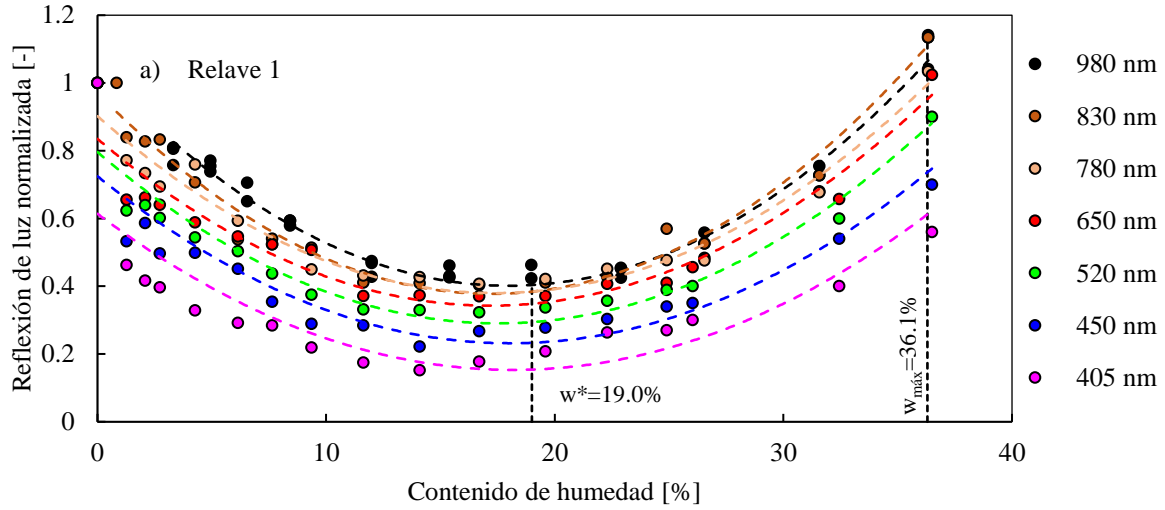
A continuación, se presentan los resultados de la relación entre la reflexión de luz y la humedad superficial en muestras de relave y suelo natural descritas en 4.6.

5.1. Efecto de longitud de onda

Para evaluar la influencia de la longitud de onda en la relación de reflexión de luz y contenido de humedad superficial, se analizaron 4 relaves, descritos en 4.3, los cuales fueron estimulados por 7 longitudes de onda. Los resultados se muestran en Fig. 5-1, donde es posible observar que la relación muestra un comportamiento parabólico para todos los casos evaluados, marcándose un tramo inicial en donde al aumentar la humedad, la reflexión de luz disminuye hasta un punto de inflexión, el cual es llamado humedad de inflexión (w^*), mientras que posterior a w^* un aumento en la humedad genera un aumento en la reflexión de luz captada. La humedad asociada al fin del comportamiento parabólico fue nombrado como humedad máxima ($w_{m\acute{a}x}$), lo cual es consistente con lo presentado por (Araya et al., 2019).

Por otro lado, a partir de los 4 relaves ensayados, se observa en Fig. 5-1 que a medida que la longitud de onda disminuye, la reflexión de luz asociada tanto a la humedad de inflexión como a la humedad máxima, disminuyen, desplazando la curva representativa hacia abajo. Además, si se comparan los rangos de reflexión de luz que abarca cada relave para todo el contenido de humedad, se observa que Relave 1 se mueve en un rango aproximado de reflexión de luz de [0.2-1.1], Relave 2 en un rango de [0.3-1], Relave 3 en un rango de [0.2-2] y Relave 4 en un rango de [0.1-1]. Esto demuestra que tanto la longitud de onda de estimulación, como el material ensayado tienen repercusiones en la relación de reflexión de luz y el contenido de humedad, confirmando lo descrito en 3.1.2, el cual explica que cada material posee distintas capacidades de absorción y reflexión de la luz, frente a condiciones de estado similares, considerando que para estimular con 7 longitudes de onda distintas, se “aisló” cada una de las longitudes del espectro visible y cercano al infrarrojo, entregándole menor variabilidad a los resultados.

Los resultados de Fig. 5-1 coinciden con lo encontrado en la literatura asociado a reflexión de luz en suelos, donde se ha evidenciado que a medida que la longitud de onda de estimulación disminuye, también disminuye la reflexión de luz, “estabilizándose” en rangos de longitudes de onda dentro del espectro NIR, como se explica en los trabajos de (Clark, 1999), (Thomasson et al., 2001) y (Prudnikova et al., 2019), donde se evidencia que las reflexiones de luz aumentan a medida que las longitudes de onda de estimulación aumentan, manteniéndose relativamente constantes a partir de longitudes de onda cercanas a los 1000nm en adelante, lo cual es posible observar más claramente en Fig. 5-2, donde se muestra que a valores bajos de longitud de onda, la tasa de incremento de reflexión de luz es mayor que a valores altos de longitud, tendiendo a cero a medida que se van acercando al rango NIR de iluminación.



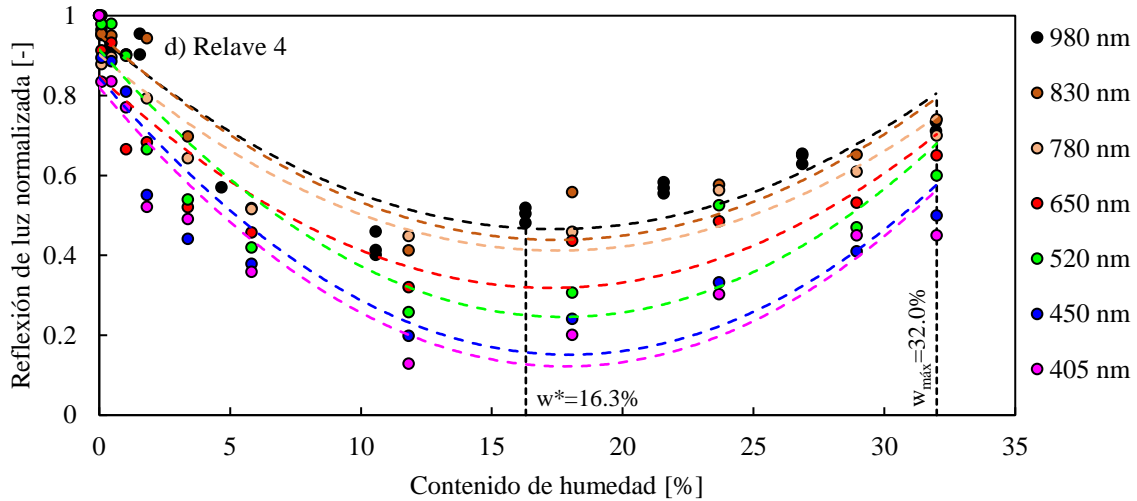


Fig. 5-1: Relación contenido de humedad y reflexión de luz en Tramo A para todos los relaves.

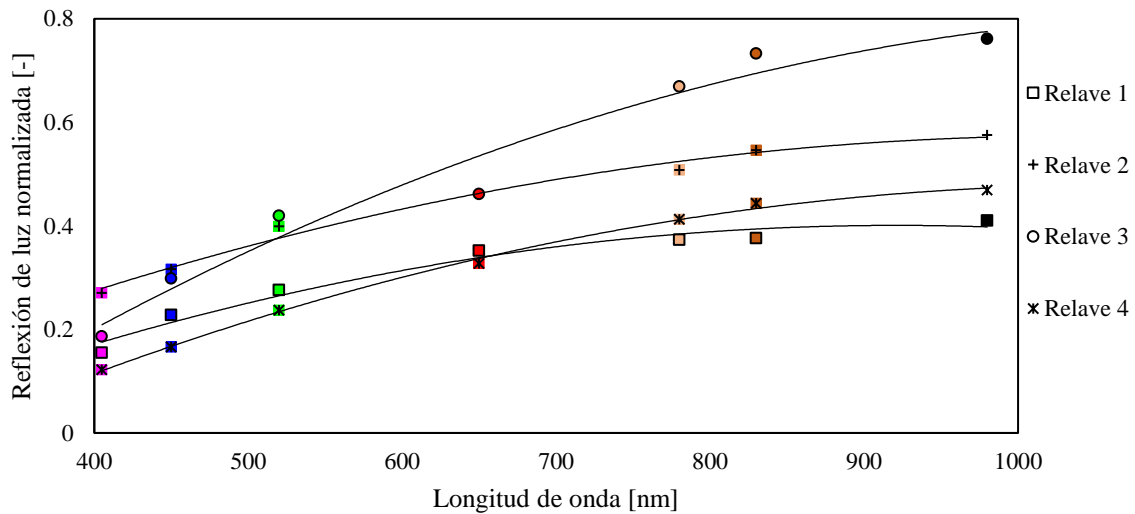


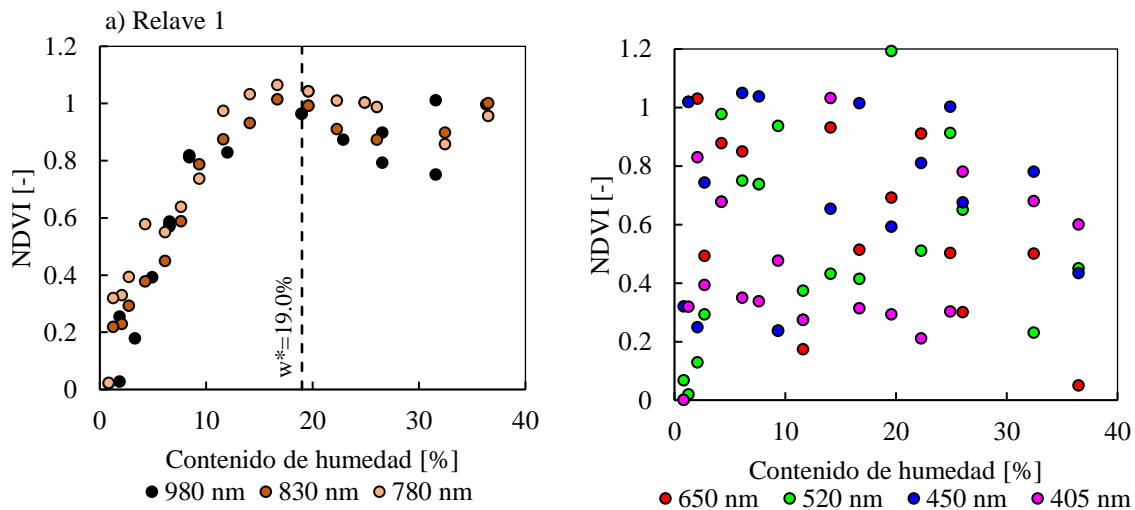
Fig. 5-2: Reflexión de luz versus longitud de onda para los 4 relaves evaluados.

Según (Clark, 1999), el aumento de la reflexión de luz en el rango visible se debe a la oxidación de los minerales presentes en los suelos, fenómeno que presenta una mayor absorción a longitudes de onda bajas. Por otro lado, (Thomasson et al., 2001) comenta que dada la estabilización de reflexión de luz a longitudes de onda altas, el rango más óptimo para medición de variables en suelos comprende entre los 950 nm y los 1500 nm.

Respecto a lo que se presenta en Fig. 5-2, se demuestra que los relaves tienen comportamientos similares a los suelos, donde se graficó el efecto de la longitud de onda respecto a un punto característico de la curva de la relación reflexión de luz y contenido de humedad, correspondiente a w^* , observándose que la reflexión de luz aumenta hasta la luz de 830 nm, siendo muy similares las reflexiones captadas entre los 830 nm y los 980 nm, sin

embargo, la pendiente con la que aumenta la reflexión de luz varía para cada relave, lo que se asocia a la diferencia de minerales existentes entre relaves, lo que afectaría en distinto grado la oxidación de minerales residuales en las muestras, evidenciado el origen de cada material. Este resultado tiene relación además con el comportamiento del coeficiente de absorción k , el cual es inversamente proporcional a la longitud de onda de la luz de estimulación, por lo que un aumento en la longitud de onda genera una disminución del coeficiente de absorción y por tanto un aumento en la reflexión.

El efecto de la longitud de onda también fue estudiado en el índice de vegetación de diferencias normalizada (NDVI), el cual es presentado en Fig. 5-3, donde se observan dos tipos de comportamiento; El primero está asociado a valores altos de longitud de onda desde los 780 nm en adelante para Relave 1, Relave 2 y Relave 4, y desde 650 nm para Relave 3, donde NDVI muestra un incremento a medida que aumenta la humedad hasta llegar aproximadamente al valor de la humedad de inflexión (w^*), desde donde el NDVI oscila en torno a un valor relativamente constante. Sin embargo, este comportamiento no es observado para valores pequeños de longitud de onda, donde el NDVI no presenta un comportamiento patrón, sino más bien, una nube de puntos que no entregan información relevante.



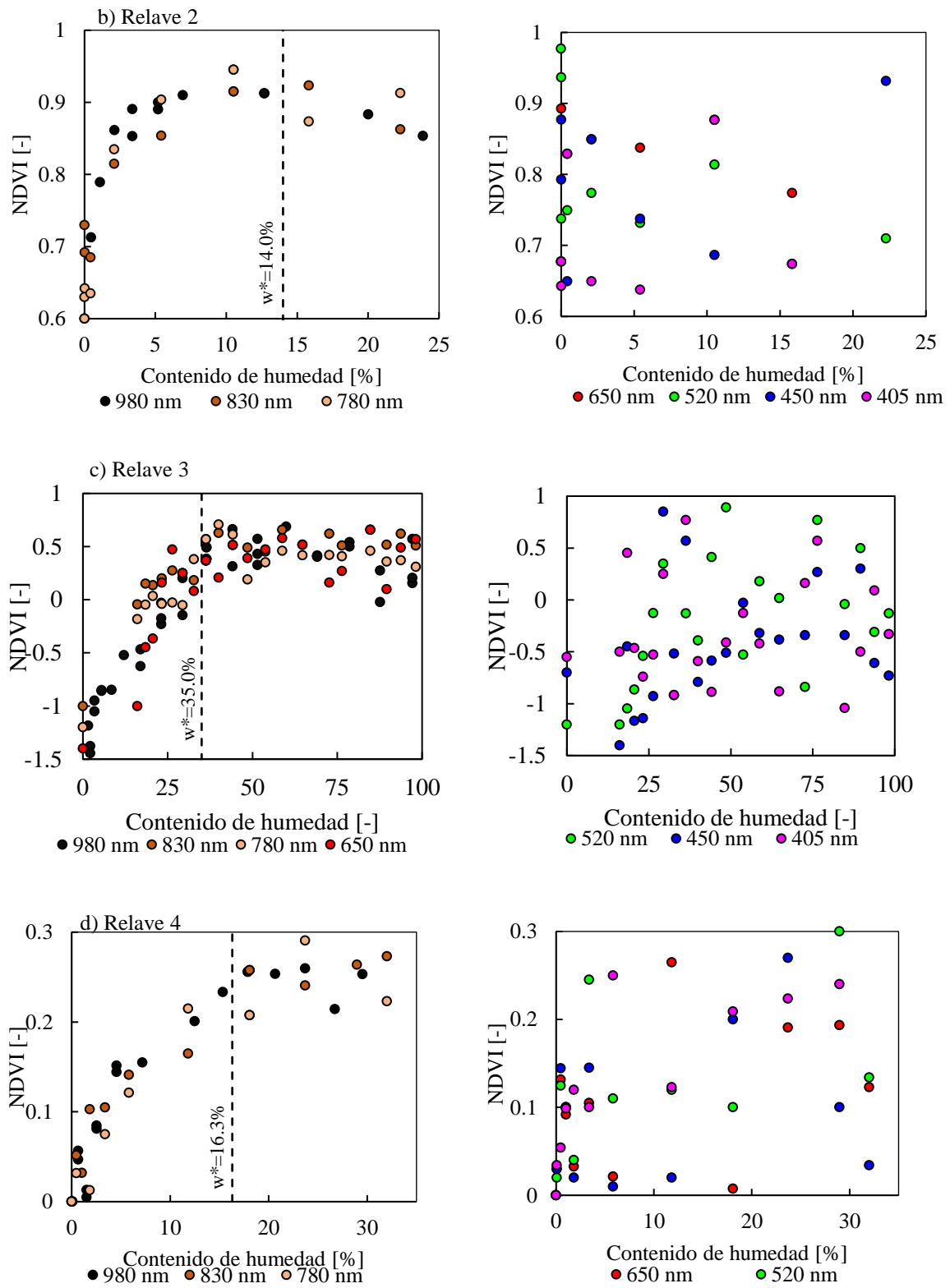


Fig. 5-3: Comportamiento de NDVI para los 4 relaves evaluados.

De los resultados de NDVI se desprenden dos comentarios; el primero hace alusión al cambio de comportamiento dado las longitudes de onda, el cual puede estar asociado a la definición del NDVI, correspondiente a la diferencia de lo obtenido en el espectro NIR y VIS, normalizado por la suma de los espectros, por lo que para longitudes de onda bajas, la iluminación del láser es visible en ambas bandas, lo que causaría esta aleatoriedad en las mediciones, mientras que para valores mayores de longitud de onda, los láseres sólo son visibles en la cámara NIR, por lo que habría un efecto de aislación de lo obtenido en la banda NIR respecto a lo almacenado en la banda VIS. Ambos fenómenos se muestran en Fig. 5-4, donde se puede observar que, para un láser en el rango cercano al infrarrojo, solo es visible para la cámara NIR, mientras que, para un láser en el rango visible, es captado por ambas cámaras VIS y NIR.

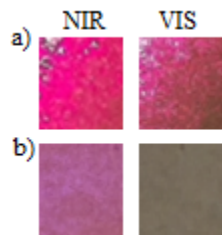


Fig. 5-4: Iluminación de láser en el espectro visible (a) y en el espectro cercano al infrarrojo (b).

Por otro lado, como se comentó, para el Relave 3, el comportamiento cambia desde la iluminación de 650 nm en adelante, el cual comienza a mostrar una tendencia similar a lo observado por el espectro NIR, pudiendo estar asociado a los diferentes orígenes de los relaves, recordando que la oxidación del mineral ocurre en el espectro visible, por lo que la diferencia de absorción de luz en este proceso varía entre un relave y otro.

Finalmente, dado que la reflexión de luz se muestra estable a longitudes de onda cercanas al infrarrojo (NIR) y que a bajas longitudes de onda el índice de vegetación de diferencia normalizada entrega un comportamiento aleatorio, es que se continúan los ensayos con la longitud de onda más cercana al rango estable de reflexión de luz, considerando el láser de 980 nm como el que muestra un comportamiento estable tanto para NDVI, como para reflexión de luz.

5.2. Efecto de la humedad en la reflexión de luz para muestras de relave

En Fig. 5-5 se muestran los resultados asociados a los rangos de humedad, llamados Tramo A y Tramo B, para los 4 relaves con estimulación de luz artificial a 980 nm, longitud de onda seleccionada a partir de lo descrito en 5.1. El Tramo A abarca el rango de humedad desde el estado seco hasta la humedad de saturación, mientras que el Tramo B, corresponde a humedades superiores a la humedad de saturación.

Es posible apreciar en Fig. 5-5 la diferencia de comportamiento entre Tramo A y Tramo B, donde, como se comentó en 5.1, existe un evidente comportamiento parabólico en la relación entre la reflexión de luz y el contenido de humedad para el rango de humedad descrito por el Tramo A, el cual finaliza al alcanzar (w_m) ya que, se puede observar para los 4 relaves evaluados, que existe un peak de reflexión tanto para el estado seco como para el estado

saturado, separados por un mínimo de reflexión asociado a una humedad en particular la cual fue llamada humedad de inflexión (w^*).

Se observa que la humedad de inflexión coincide aproximadamente con el límite de contracción de Relave 1 y Relave 3, como se muestra en Tabla 5-1, donde la diferencia porcentual entre el límite de contracción y la humedad de inflexión es 1.0% y 3.5% respectivamente. Esto permite considerar a la curva encontrada, como una herramienta para determinar el vertido de las siguientes capas de relaves para depósitos espesados (Simms et al., 2010), de los cuales se espera que lleguen lo más cercano al límite de contracción para reducir su volumen y aumentar la estabilidad física de los depósitos, por lo tanto, valores de reflexión que denoten una humedad menor a w^* , estarían dentro del rango esperado para depositar.

Tabla 5-1: Relación entre humedad de inflexión y límite de contracción en muestras de relaves

Muestra	Humedad de inflexión [%]	Límite de contracción [%]	Diferencia [%]
Relave 1	19.0	19.2	1.0
Relave 3	35.0	37.3	3.5

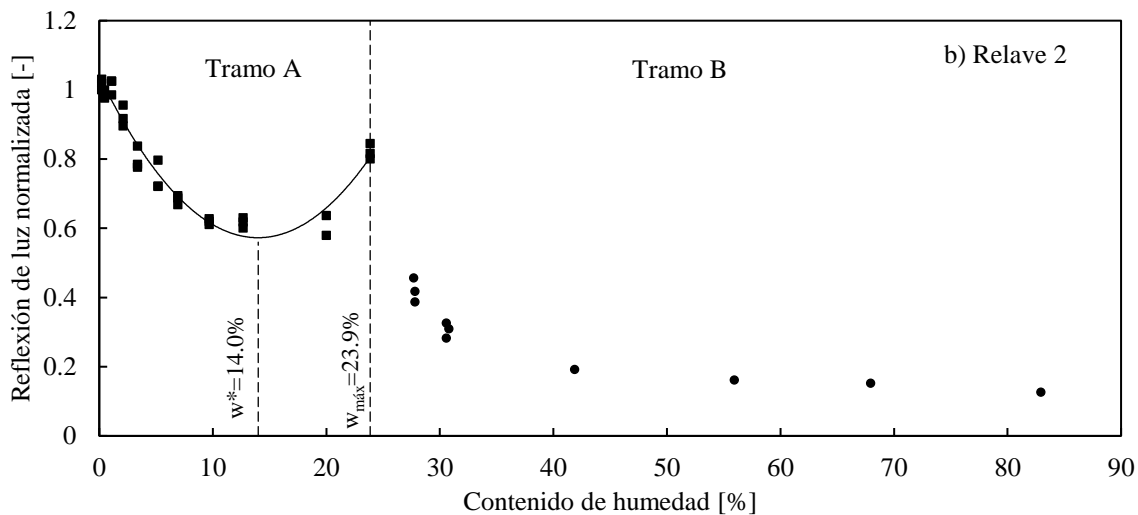
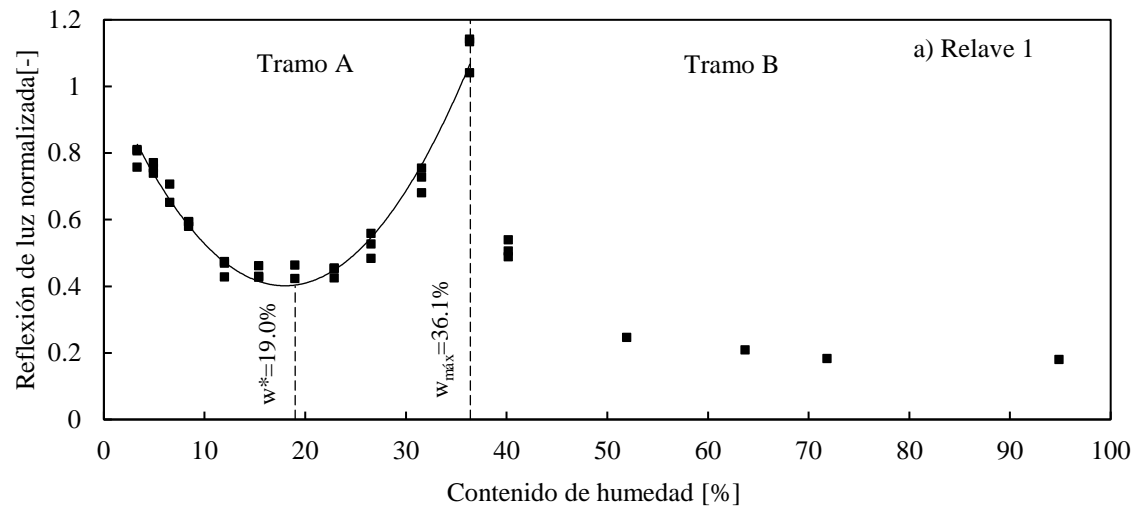
Por otro lado, se observa que, para los 4 relaves evaluados, el fin del comportamiento parabólico, es decir, asociado al Tramo A, presenta similitudes con la humedad de saturación a la cual fueron preparadas las muestras, como se presenta en Tabla 5-2, donde la diferencia entre dichos valores va en un rango de entre 2.2% hasta 6.6%.

Tabla 5-2: Relación entre humedad de máxima y humedad de saturación en muestras de relaves.

Muestra	Humedad máxima [%]	Humedad de saturación [%]	Diferencia [%]
Relave 1	36.1	35.3	2.2
Relave 2	23.9	25.6	6.6
Relave 3	97.8	94.0	4.0
Relave 4	32.0	30.8	3.9

El tramo comprendido entre w^* y $w_{m\acute{a}x}$ es útil para identificar zonas en las cuales el proceso de agrietamiento en relaves de granulometría fina comienza, dado que se estaría a humedades mayores a la asociada al límite contracción, pero menores a la humedad de saturación (Ávila Álvarez, 2005). Por otro lado, esta zona sería útil para identificar la variación de la resistencia cíclica de los relaves, la cual disminuye a partir del aumento de la humedad a un 70%, disminuyendo bruscamente al llegar a un 95% de la saturación (Tsukamoto et al., 2014). Además, conocer la humedad en este tramo de la relación ayuda a identificar la capacidad de escurrimiento de los relaves y por tanto generar una estimación de la geometría superficial de los depósitos (Che et al., 2018).

Finalizando el Tramo A, al seguir aumentando la humedad se presenta el Tramo B, donde la respuesta de la reflexión de luz es totalmente distinta al primer tramo, observándose un brusco decaimiento de la reflexión y posteriormente una estabilización de la reflexión a valores bajos cercanos a cero, manteniéndose relativamente constante con el aumento de la humedad, como se muestra en Fig. 5-5. El decaimiento de la reflexión de luz se asocia a la formación de una película de agua en suelos con humedades mayores a la saturación, las cuales se presentan en las probetas debido a que los espacios vacíos entre las partículas de relave están completamente llenos de agua, por lo tanto, el agua se comienza a acumular por sobre las muestras. Esta capa de agua absorbe más luz que el relave húmedo dada la magnitud de la absorbancia del agua, la cual ronda los 10^2 m^{-1} a longitudes de onda cercanas a 1000 nm (Dera, 2007), mientras que para suelos, la absorbancia es del orden de los 0.1 m^{-1} (Clark, 1999), lo que explicaría el brusco decaimiento de reflexión de luz. Este tramo sería un indicador de zonas cubiertas por agua en los depósitos, como por ejemplo la laguna de aguas claras, lo que permitiría tener un control de su ubicación en el depósito.



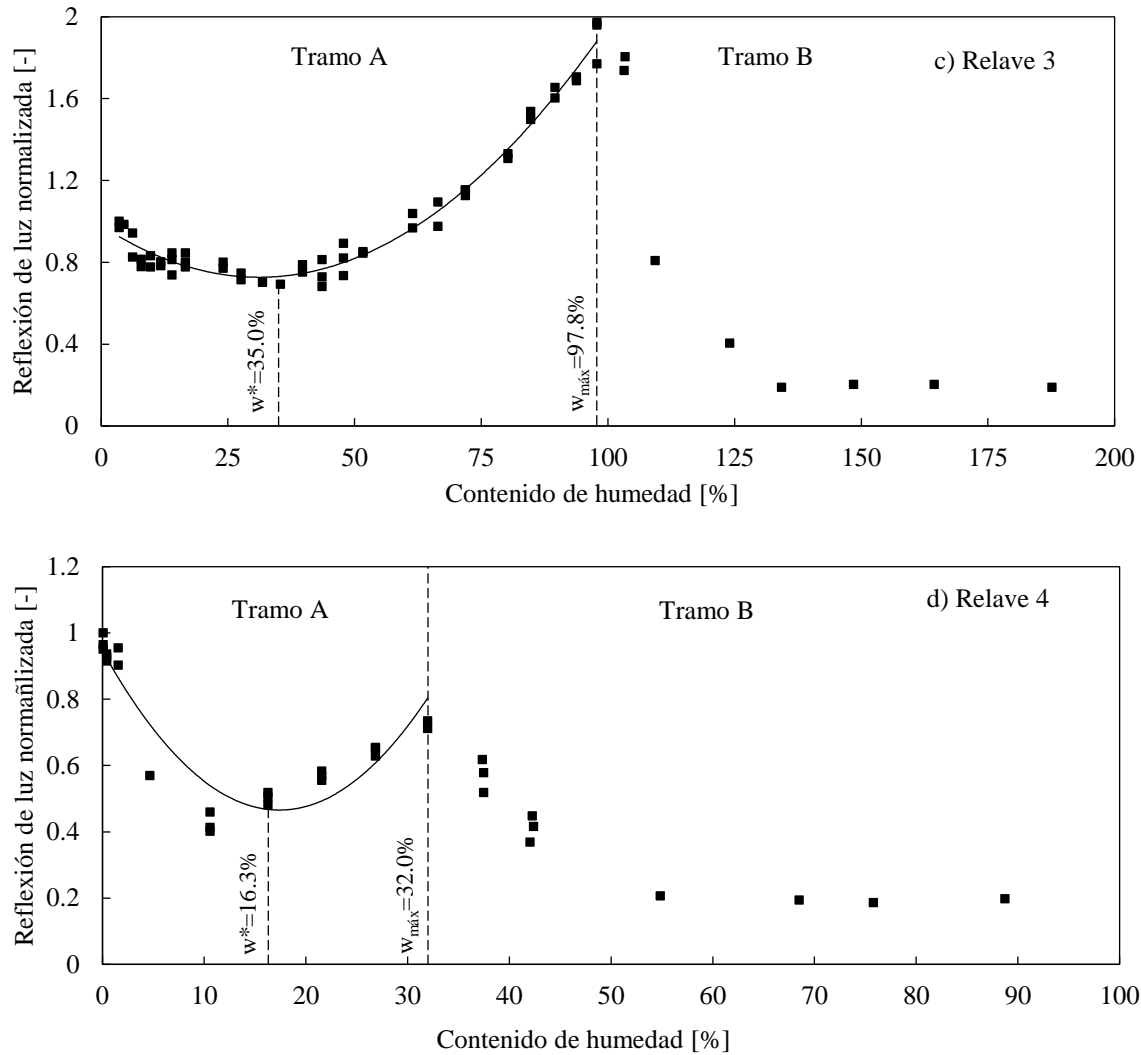


Fig. 5-5: Evaluación de Tramo A y Tramo B para los 4 relaves.

Como se explicó en 4.5, la medición de reflexión es obtenida a partir de la selección de un tramo homogéneo de los pixeles presentes en cada imagen. Para poder identificar la distribución de la reflexión de luz en torno a los pixeles de la sección utilizada respecto a los rangos de humedad abarcados, es que se realiza el histograma mostrado en Fig. 5-6, donde se observa que la distribución de la reflexión de luz para cada nivel de humedad corresponde a una normal. Además, para humedades cercanas a (w^*), la dispersión de la reflexión de luz disminuye, mientras que la dispersión de la distribución aumenta, a medida que la humedad se acerca a los extremos de la parábola, lo cual se asocia al cambio de comportamiento al aumentar la humedad desde un estado seco, donde la reflexión disminuye, y posterior a (w^*), la reflexión aumenta.

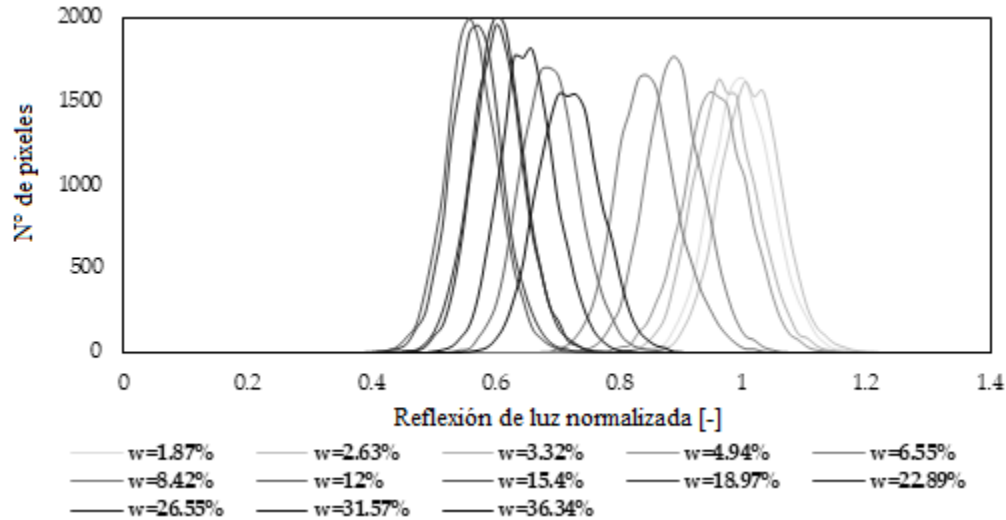


Fig. 5-6: Histograma de reflexiones de luz asociada a cada humedad.

En resumen, para todas las muestras ensayadas, se observa que (w_m) coincide aproximadamente con la humedad de saturación (w_{sat}) de las probetas, por lo que este punto de la curva entregaría información sobre relaves saturados, mientras que por su parte, (w^*) es similar al límite de contracción, por lo que este punto ayudaría a identificar zonas en las que el volumen del depósito llegó a su mínimo, pudiendo por ejemplo, determinar colocar la siguiente capa para el caso de relaves espesados (Simms et al., 2010). Por otro lado, la zona de crecimiento de la parábola sería un tramo indicador del decaimiento de la resistencia ciclica la cual se produce al 70% de saturación llegando al mínimo a un 95% de saturación (Tsukamoto et al., 2014), además de ser una zona donde es posible identificar inicios de agrietamiento en relaves finos, dado que se encuentra bajo la saturación pero sobre el límite de contracción (Ávila Álvarez, 2005).

5.3. Efecto de la densidad seca

Para evaluar el efecto de la densidad en la relación correspondiente al tramo A, se ensaya el Relave 1 a 4 densidades secas distintas, correspondientes a 1.31 gr/cc, 1.56 gr/cc, 1.67 gr/cc y 1.72 gr/cc. Los resultados se presentan en Fig. 5-7, desde donde se observa que el comportamiento sigue siendo parabólico, sin embargo, a medida que la densidad aumenta, la reflexión mínima disminuye. Esto puede estar asociado a una mayor continuidad del medio, en este caso del relave, el cual permitiría que la luz viaje por él, aumentando la absorción y por tanto disminuyendo la luz reflejado, como se explica en (Clark, 1999).

Los resultados del efecto de la densidad en la relación muestran dos particularidades; La primera corresponde a que la humedad de inflexión (w^*), se mantiene relativamente constante, lo que indicaría que este parámetro no está determinado por la densidad, sino más bien, como se explicó en 5.2, estaría influenciado principalmente por el límite de contracción de los materiales; Por otro lado, la diferencia de la reflexión de luz previo a (w^*), es menor respecto al tramo posterior. Esto puede deberse a que el primer tramo es inferior al límite de contracción, por lo que el volumen de la probeta se mantiene constante, sin embargo posterior

a (w^*), hay un hinchamiento de la probeta con el aumento de la humedad y por tanto un medio menos “continuo”, lo que aumentaría las diferencias de reflexión.

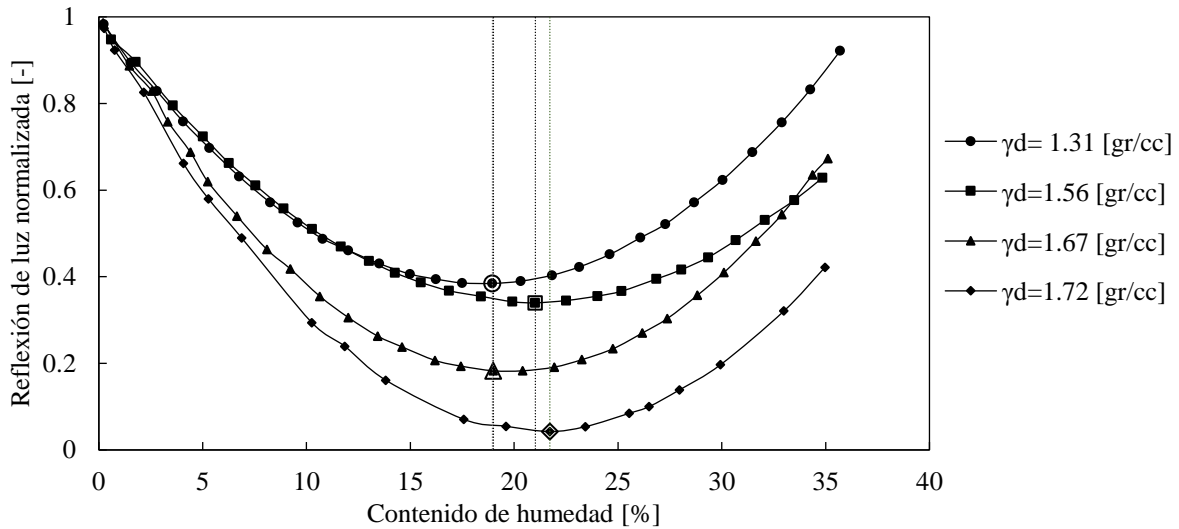


Fig. 5-7: Efectos de la densidad seca en la relación reflexión de luz y contenido de humedad.

La variación de w^* y del rango de reflexión de luz por efectos de la densidad se presentan en Tabla 5-3. Respecto al rango de reflexión de luz, que aumente con la densidad quiere decir que la reflexión de luz ha disminuido, lo cual concuerda con lo hallado en la literatura, que comenta que mientras más continuo sea el medio en el cual el haz de luz llega, más fácil podrá transportarse a través de él, pudiendo ser absorbido o refractado según como se vean afectado sus índices (Clark, 1999). Entonces, que el relave se encuentre más denso, quiere decir que sus partículas se encuentran más juntas, permitiendo que el haz de luz viaje con mayor facilidad por la probeta, disminuyendo la luz reflejada.

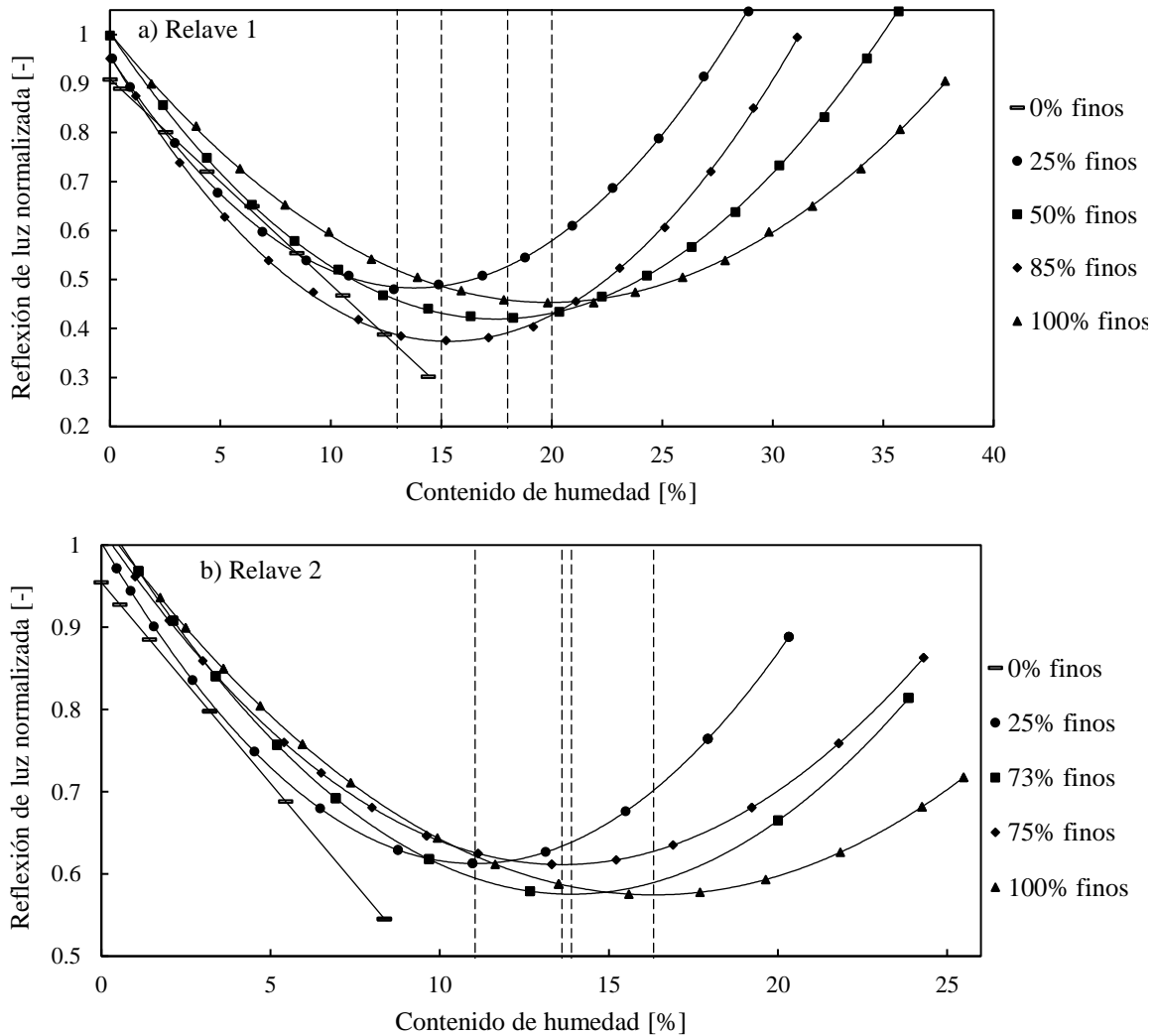
Tabla 5-3: Variación de w^* y reflexión de luz debido al cambio de densidad

Densidad [gr/cc]	1.31	1.56	1.67	1.72
Humedad de inflexión [%]	18.9	21.0	19.0	21.7
Rango reflexión de luz normalizada [-]	[0.38-1]	[0.34-1]	[0.18-1]	[0.04-1]

Respecto a w^* , no es posible aseverar que existe un aumento o una disminución, o algún comportamiento patrón asociado a la variación de la densidad, sino más bien, que se mantiene en un rango relativamente acotado, y que continúa siendo similar al límite de contracción del Relave 1.

5.4. Efecto del contenido de finos

Se evaluó el efecto del contenido de finos en la relación de reflexión de luz y contenido de humedad para cada una de las muestras preparadas con contenidos de finos entre 0% a 100% de relave 1, relave 2, y las mezclas entre Suelo 1 y Suelo 2, cuyos resultados se muestran en Fig. 5-8, desde donde se desprenden tres observaciones importantes: La primera consiste en que un cambio en la granulometría del relave no influye en el rango de reflexión de luz medido, manteniéndose en los mismos rangos independiente de la granulometría; luego se evidenció que un aumento en el contenido de finos genera un desplazamiento de w^* a humedades superiores, ocurriendo en ambos casos; como tercer comentario, para los casos en donde el relave tiene 0% de finos, el comportamiento del Tramo A de humedad deja de ser parabólico, mostrando un comportamiento más bien lineal, mientras que para el resto de granulometrías se mantiene un comportamiento similar a lo visto en la granulometría original de los relaves, identificándose el comportamiento parabólico asociado al rango de humedad de Tramo A.



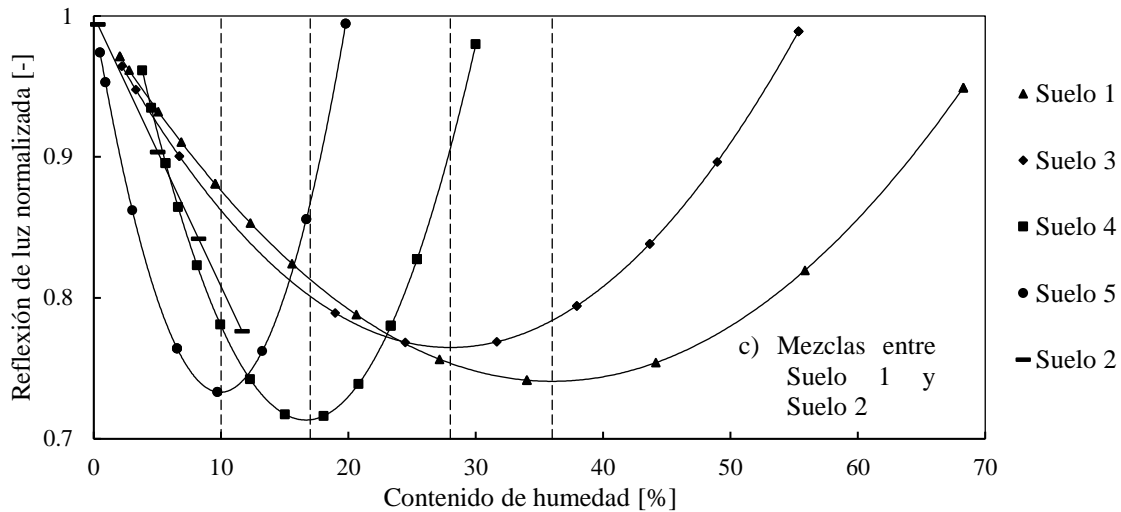


Fig. 5-8: Efecto del contenido de finos en la relación de reflexión de luz y contenido de humedad.

Por otro lado, no se observa variación significativa de la reflexión de luz al aumentar el contenido de finos, ya que los rangos de reflexión se mantienen relativamente constante en muestras del mismo origen (aproximadamente 0.35-1.1 Relave 1, 0.6-1 Relave 2, 0.7-1.0 para suelo natural), por lo que se podría decir que la granulometría no afecta el rango de reflexión de luz, sino que se ve influenciado por el origen de la muestra, el cual si presenta diferencias entre un material y otro.

En los tres materiales, se observó que la muestra con 0% de finos, no muestra el comportamiento parabólico observado normalmente, sino que presenta una relación lineal, lo cual puede deberse a que, al no tener finos, no se evidencia el cambio de comportamiento asociado al paso de (w^*). Lo anterior concuerda con lo estudiado por (Sadeghi, Jones, & Philpot, 2015), el cual presenta una relación lineal entre la reflexión de luz y contenido de humedad para mediciones en 1650 nm y 2210 nm, sin embargo, a medida que aumenta el contenido de finos, disminuye la linealidad de la relación.

Por otra parte, en todos los escenarios se observa que un aumento del contenido de finos cambia la ubicación de la humedad de inflexión, desplazando (w^*) a la derecha. Esto es graficado en Fig. 5-9 la cual muestra para los tres casos que la relación (w^*) y contenido de finos (CF) tiene un comportamiento lineal creciente. Lo anterior tiene sentido, ya que si asumimos que (w^*) tiene relación con el límite de contracción, un aumento del contenido de finos provocará un aumento en los límites de Atterberg, y por tanto un aumento de (w^*).

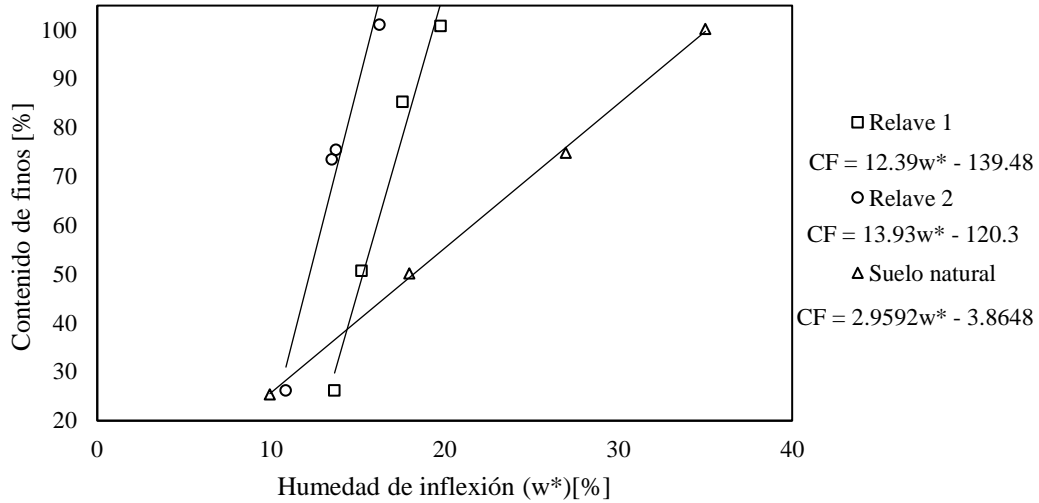


Fig. 5-9: Evolución de (w*) con el aumento del contenido de finos.

Según la literatura, uno de los principales factores que influyen en la relación de reflexión de luz y contenido de humedad es el contenido de arcilla que poseen los materiales (Sadeghi, Jones, & Philpot, 2015), lo que influye en distinta proporción para las mezclas realizadas, ya que el porcentaje de arcilla para cada material es distinto, como se muestra en Tabla 5-4 **Error! Reference source not found.**, del total de finos que se van incorporando a la mezcla, la cantidad de arcilla que ingresa es distinta en cada caso, y ésta es la que entrega las propiedades plásticas a los suelos, por lo que si se considera que w* está relacionado con el límite de contracción, pues se verá influenciado principalmente por el contenido de arcilla, más que por el contenido de finos.

Tabla 5-4: Porcentaje de arenas, limos y arcillas de las muestras de ensayo.

Muestra	Contenido				Tasa de cambio de w* [w*%/CF%]
	Arena [%]	Limo [%]	Arcilla [%]	Arcilla del total de finos [%]	
Relave 1	14.0	66.0	20.0	23.3	0.08
Relave 2	26.5	64.7	8.8	11.9	0.07
Suelo 1	0.0	55.0	45.0	45.0	0.34
Suelo 2	88.0	12.0	0.0	0.0	

En Tabla 5-4 se puede observar que las combinaciones que más poseen arcilla corresponden a mezclas de Suelo 1 con Suelo 2, Relave 1 y finalmente Relave 2, lo que coincide con las tasas de cambio de w^* , sin embargo, las tasas de cambio varían bastante entre un material y otro, lo cual se asocia al tipo de mineral arcillo contenido en cada mezcla, la cual afecta directamente a la plasticidad del material.

Esto se debe a que el porcentaje de finos agregado a las mezclas difiere en porcentaje de limos y arcillas, en donde el fino de Relave 1 está compuesto por 23.3% de arcilla, el fino de Relave 2 tiene un 11.9% de arcilla, y el fino utilizado en las mezclas de suelo natural tiene 45% de arcilla. Lo anterior implica que al agregar $x\%$ de finos a las muestras, en realidad se está agregando menos cantidad de arcilla al Relave 2, seguido por Relave 1, siendo las mezclas de suelo natural las que más poseen arcilla, y por lo tanto una mayor tasa de cambio respecto a las muestras de relaves.

5.5. Efecto del origen del material

Respecto a los resultados entre las muestras de relave y suelos, se observan diferencias principalmente en los rangos, tanto de humedad como de reflexión, mientras que el comportamiento general, sigue siendo el mismo. Una de las diferencias son los rangos de reflexión de luz captada para cada muestra, los que se muestran en Tabla 5-5, desde donde se aprecia que, para todas las muestras, la reflexión de luz asociada al estado seco es 1, lo cual tiene sentido dado que la definición de reflexión normalizada es realizada por el valor de reflexión de $w=0\%$. Sin embargo, el valor de reflexión de luz correspondiente a las muestras secas no siempre es el máximo valor, ya que, para las muestras con granulometría más fina, es decir, Relave 1, Relave 3 y Suelo 1, el valor de reflexión de luz asociada a w_{max} (peak post w^*), es mayor o muy cercano a 1, mientras que, para las muestras de granulometría más gruesas, este valor se mantiene notoriamente por debajo de 1. Esto podría entregarles aún más valor a las curvas de reflexión y humedad, dado que servirían como un primer diferenciador de suelos finos y gruesos.

Tabla 5-5: Resultados de reflexión y w^* para las muestras de relaves y suelos.

Muestra	Humedad de inflexión [%]	Reflexión en $w=0\%$	Reflexión en $w= w^*\%$	Reflexión en $w=w_{max}\%$
Relave 1	19.0	1.0	0.41	1.11
Relave 2	14.0	1.0	0.58	0.81
Relave 3	35.0	1.0	0.78	2.27
Relave 4	16.3	1.0	0.47	0.82
Suelo 1	36.0	1.0	0.74	0.95
Suelo 2	11.7	1.0	0.77	-

Por otro lado, de Tabla 5-5 se presenta también la reflexión asociada a w^* , la cual no muestra relación variación con la granulometría, sino más bien con el origen de los materiales, cuya relación no es posible determinar con la información disponible en esta investigación, dado que no se tiene conocimiento de la mineralogía de los materiales.

Finalmente, se observa que la muestra de Suelo 2 no presenta reflexión asociado a $w_{\text{máx}}$ dado que no existe este punto en la curva, debido al comportamiento lineal mostrado, lo que es asociado al bajo contenido de finos que este material presenta.

5.6. Uso de reflexión de luz e índice NDVI para estimación de humedad

La relación encontrada entre la reflexión de luz y el contenido de humedad en el Tramo A es de comportamiento parabólico. Una relación cuadrática tiene asociado para un valor en la ordenada, dos valores en la abscisa. Esto genera la necesidad de incluir otra herramienta que colabore a identificar, a partir de la medición de reflexión de luz, la humedad asociada a un valor de reflexión de luz asociado a dos humedades.

El índice de vegetación de diferencias normalizada (NDVI), a la longitud de onda seleccionada de 908 nm, presentó en el Tramo A dos comportamientos; El primero muestra un aumento del NDVI con el aumento de la humedad hasta llegar a aproximadamente w^* , por otro lado, el segundo comportamiento se presenta a partir de humedades mayores a w^* , donde un aumento en la humedad no genera cambio en el NDVI, el cual se mantuvo relativamente constante en un rango acotado.

Luego de haber evidenciado el comportamiento del índice NDVI, se observa que su control puede, en conjunto con la curva característica de la relación de humedad y reflexión de luz, ayudar a identificar la humedad en las muestras. El procedimiento de evaluación corresponde a realizar mediciones de reflexión de luz para posteriormente obtener la reflexión de luz normalizada y el índice NDVI, como se detalló en 4.5. Luego, se desprenden dos casos; el primero es el caso a) mostrado en Fig. 5-10, donde la humedad asociada a la reflexión de luz medida corresponde a una anterior a w^* , dado que el índice NDVI se encuentra en la zona de crecimiento; el segundo caso es el representado en b), donde la humedad del relave corresponde a una humedad mayor a w^* ya que el índice NDVI asociado se encuentra en la zona estable.

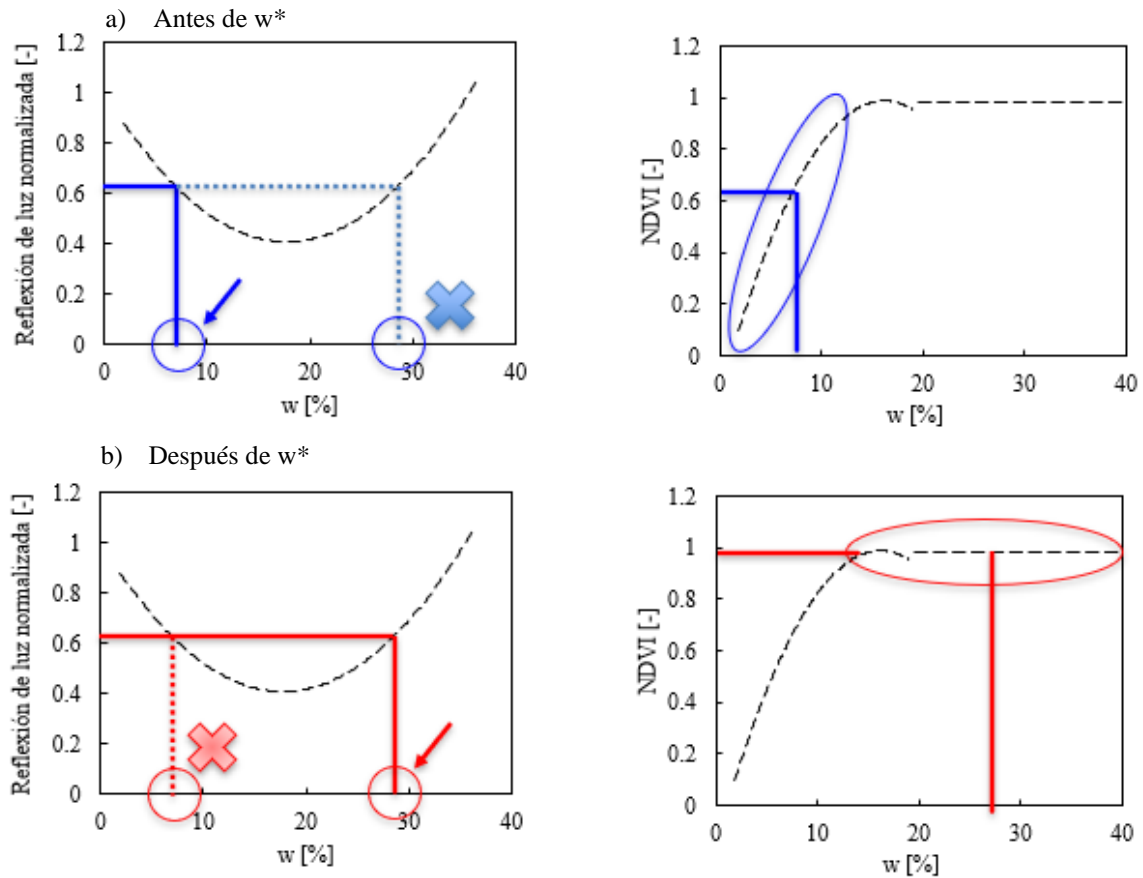


Fig. 5-10: Ejemplo de estimación de humedad a partir de reflexión de luz e índice NDVI.

CAPÍTULO 6: Conclusiones

Esta investigación muestra 5 tipos de ensayos realizados para evaluar la relación entre la reflexión de luz y el contenido de humedad superficial en muestras de relave y suelo natural. Los ensayos evalúan; Influencia de longitudes de onda; Relación previa a la saturación y posterior a la saturación; Efectos de origen del material; Influencia de la densidad del material; Respuesta a la variación del contenido de finos de las muestras.

Los ensayos fueron realizados en el “Laboratorio de Ensaye y Control de Obras” LEMCO, de la universidad Técnica Federico Santa María, los cuales permitieron relacionar el contenido de humedad superficial en muestras de depósitos de relave, provenientes de la extracción de cuatro minerales distintos, y suelo natural correspondiente a arena de Ottawa y arcilla esmecítica, utilizando cámaras multiespectrales que trabajan en el espectro visible (VIS 400 nm hasta 700 nm) y cercano al infrarrojo (700 nm hasta 1000 nm), además de iluminación natural y activa proveniente de 7 láseres a longitudes de onda de 980 nm, 830 nm, 780 nm, 650 nm, 520 nm, 450 nm y 405 nm, con el fin de abarcar la mayor cantidad de bandas espectrales. Para los ensayos se montaron probetas de cada uno de los materiales los cuales fueron preparados a humedades superiores a la saturación, los cuales fueron estimulados con la iluminación descrita y monitoreados con las cámaras en un proceso de disecación hasta el estado seco, generándose dos zonas de humedad de evaluación, correspondientes a humedades menores a la saturación llamado Tramo A, y humedades mayores a la saturación definido como Tramo B. Además, se aplicó como herramienta en conjunto con la relación, el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el cual aportó en la interpretación de resultados.

Los primeros ensayos evaluaron el Tramo A de humedad y fueron aplicados a 4 muestras de relaves provenientes de la extracción de hierro, cobre, oro y multimineral, llamados Relave 1, Relave 2, Relave 3 y Relave 4, respectivamente. De estos ensayos se determinó la iluminación idónea para los ensayos siguientes, donde se evidenció que un aumento en la longitud de onda de la luz estimulante genera un aumento en la reflexión de luz en el rango visible, hasta aproximadamente los 650 nm, mientras que entrando al rango cercano al infrarrojo la reflexión de luz comienza a estabilizarse. Por otro lado, la evaluación del índice NDVI mostró un comportamiento patrón en el rango de 780 nm en adelante, mientras que no fue posible describir el comportamiento para longitudes de onda en el rango visible, lo que llevó a la determinación de que la longitud de onda más estable y comportamiento definido para longitudes de onda evaluadas corresponde a la de 980 nm, la que según la literatura está dentro del rango ideal para estimaciones de humedad en suelos.

Los ensayos siguientes se acotaron a la estimulación de iluminación de 980 nm, la que, para el caso de ensayos en relaves, se aplicó en Tramo A y Tramo B de humedad. En el Tramo A el comportamiento entre la relación de reflexión de luz y contenido de humedad corresponde a una relación parabólica, la cual presenta 3 puntos característicos; el primero corresponde al inicio de la parábola asociado a una humedad de 0%; el segundo punto es el punto de inflexión de la parábola llamado humedad de inflexión (w^*), el cual resultó ser muy similar a los límites de contracción de los relaves; y finalmente el último punto de la parábola llamado humedad máxima ($w_{m\acute{a}x}$), el cual mostró relación con la humedad de saturación de

las probetas. Estos resultados entregan mayor utilidad a la curva hallada, dado que no solo sería útil para el estudio de la humedad superficial, sino que también para estimar puntos saturados de los relaves y zonas en las que se ha llegado al límite de contracción. Por otro lado, en el Tramo B de humedad, se evidenció un comportamiento distinto al anterior, donde un aumento en la humedad denota un brusco decaimiento en la reflexión de luz captada, el cual es asociado a la película de agua que se genera sobre las probetas, absorbiendo la luz emisora.

Respecto al comportamiento del Tramo A, no es suficiente por si solo para estimar la humedad, dado que una medición de reflexión de luz es asociada a dos humedades posibles. Dado esto, se utiliza el índice NDVI, el cual presenta dos tramos de comportamientos divididos por la humedad de inflexión. El primer tramo muestra un aumento del NDVI con el aumento de la humedad desde un 0% de humedad hasta w^* %, luego el NDVI se estabiliza hasta al menos el rango de humedad evaluados para cada probeta. Esto indica que, si el NDVI está en el rango creciente de comportamiento, la humedad asociada a la reflexión de luz medida corresponde a la que está antes de w^* , de lo contrario, si el NDVI se encuentra en la zona estable, entonces la humedad corresponde a la que se encuentra posterior a w^* .

La evaluación del Tramo A efectuado para las muestras de Relave 1 se realizó para 4 niveles de densidad seca en el rango de 1.31 gr/cc hasta 1.72 gr/cc. Estos ensayos demostraron que el comportamiento parabólico se mantiene, independiente de la densidad evaluada, sin embargo, se produce un aumento en el rango de reflexión de luz a medida que aumenta la densidad seca, disminuyendo la reflexión asociada a w^* . Esto se asocia a una mayor continuidad en el medio receptor, lo que, según la literatura, favorecería la absorción y transmisión de luz, disminuyendo la reflexión.

Para los Relaves 1 y 2 se realizaron ensayos variando su contenido de finos, en donde se separó la fracción gruesa de la fina mediante el tamiz n°200, y se varió de 0% a 100% el contenido de finos. Esto mismo fue aplicado a mezclas realizadas entre Suelo 1 y Suelo 2. Los resultados mostraron que, para los tres casos evaluados, un aumento en el contenido de finos generaba un aumento de w^* , lo cual se asocia a que un mayor contenido de finos afecta en los límites de Atterberg de las muestras originales. Por otro lado, se evaluó la tasa de cambio de w^* y se evidenció que a medida que los finos tienen más cantidad de arcilla, la tasa de cambio aumenta, la que también se estima está influenciada por el tipo de mineral arcilloso que contienen las mezclas. Además, se observó que en las mezclas que no tenían finos, la relación deja de ser parabólica, mostrando un comportamiento lineal, no pudiendo identificar w^* , lo cual se entiende a que, al no tener finos, no poseen características plásticas. Respecto al rango de reflexión de luz al variar la granulometría, no se observa una variación significativa, lo que se asocia a que la principal influencia en el rango de reflexión de luz tiene que ver con la densidad, como se mencionó anteriormente, y con el origen de los materiales.

Por otro lado, respecto al origen de los materiales evaluados, se logró evidenciar que todos muestran comportamientos parabólicos en el Tramo A, sin embargo, existen diferencias entre rangos de humedades y reflexión captadas. Se observó que, para materiales de granulometría fina, la reflexión de luz asociada a $w_{máx}$ es mayor o muy cercana a 1, mientras que, en materiales con granulometría principalmente gruesa, los valores son del orden de 0.8, lo que permitiría estimar, a partir de la reflexión asociada a $w_{máx}$, un primer filtro de la granulometría del material.

Finalmente, el uso de las curvas halladas para estimar la humedad en muestras de relaves tendría un valor agregado al poder identificar características adicionales a la humedad, correspondientes a humedad de saturación, límite de contracción, y primer filtro para determinar la granulometría. Además, se evidencia que la relación se ve afectada no solo por la humedad, sino que por la densidad de los materiales, el origen del material, la granulometría, la longitud de onda de estimulación y el tramo de humedad evaluado.

CAPÍTULO 7: Referencias

- Decreto 50, 1 (2022). Alva, J., & Escalaya, M. (2011). Instrumentación Geotécnica de la Presa Pillones. *Geotechnical Conference*.
- Araya, V., Suazo, G., Villavicencio, G., & Silva, M. (2019). Monitoreo de la humedad en depósitos de relave a partir de mediciones de reflexión de luz. *Obras y Proyectos*, 25, 35–41. <https://doi.org/10.4067/s0718-28132019000100035>
- Asenjo, R. H. (2010). *Efecto Del Esfuerzo De Corte Estático Inicial En La Resistencia Cíclica En Una Arena De Relaves*.
- Ávila Álvarez, G. (2005). Estudio de la retracción y el agrietamiento de arcillas. Aplicación a la arcilla de Bogotá. *TDX (Tesis Doctorals En Xarxa)*. <http://www.tdx.cat/handle/10803/6233>
- Babaeian, E., Sadeghi, M., Gohardoust, M. R., Arthur, E., Jones, S. B., & Tuller, M. (2017). Application of Shortwave Infrared Imaging for Estimation of Soil Hydraulic Properties. *CSSA and SSSA International Annual*.
- Babaeian, E., Sadeghi, M., Jones, S. B., & Tuller, M. (2019). Relating Evapotranspiration Rate, Soil and Plant Temperature, and Swir Reflectance for Root Water Uptake Estimation. *SSSA International Soils Meeting*.
- Brauers, J., & Aach, T. (2006). A Color Filter Array Based Multispectral Camera. *12 Workshop Farbbildverarbeitung*. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84863126551&partnerID=tZOtx3y1%5Cnhttp://www.lfb.rwth-aachen.de/files/publications/2006/BRA06a.pdf>
- Brune, D., Hellborg, R., Persson, B. R. R., Pääkkönen, R., & Shapiro, J. (2003). Radiation: At Home, Outdoors and in the Workplace. In *American Journal of Physics* (Vol. 71, Issue 2). <https://doi.org/10.1119/1.1522706>
- Castro, A. De. (2019). *Bell ' s violations via electronic digital printing technology technology*. January. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25931.44323>
- Changul, C., Sutthirat, C., Padmanahban, G., & Tongcumpou, C. (2010). Chemical characteristics and acid drainage assessment of mine tailings from Akara Gold Mine in Thailand. *Environmental Earth Sciences*, 60(8), 1583–1595. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0293-0>
- Chapman, P., Williams, D., Rohde, T., & Ennor, S. (2008). Understanding the Water Balance of Potentially Acid Forming Tailings Deposited in a Dry Climate. *Proceedings of the Third International Seminar on Mine Closure*, 499–509. https://doi.org/10.36487/acg_repo/852_45
- Che, D., Liang, A., Li, X., & Ma, B. (2018). Remote sensing assessment of safety risk of iron tailings pond based on runoff coefficient. *Sensors (Switzerland)*, 18(12). <https://doi.org/10.3390/s18124373>
- Clark, R. N. (1999). Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy.

- Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing, 01*, 3–58.
- Dalal, R. C., & Henry, R. J. (1986). Simultaneous Determination of Moisture, Organic Carbon, and Total Nitrogen by Near Infrared Reflectance Spectrophotometry. *Soil Science Society of America Journal*, 50(1), 120–123. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000010023x>
- Dera, B. W. and J. (2007). Light Absorption by Water Molecules and Inorganic Substances Dissolved in Sea Water. In *Light Absorption in Sea Water* (pp. 11–81). https://doi.org/10.1007/978-0-387-49560-6_2
- Decreto Supremo N° 248: Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves, Diario Oficial 159 (2007). http://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/01/DS248_Reglamento_DepositosRelave.pdf
- Entezari, I., Rivard, B., Lipsett, M., & Wilson, W. (2013). Application of hyperspectral remote sensing in estimation of oilsands tailings water content. *Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing, Evolution in Remote Sensing, 2013-June*, 2–5. <https://doi.org/10.1109/WHISPERS.2013.8080689>
- Entezari, Iman, Rivard, B., Geramian, M., & Lipsett, M. G. (2017). Predicting the abundance of clays and quartz in oil sands using hyperspectral measurements. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 59, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.02.018>
- Entezari, Iman, Rivard, B., & Lipsett, M. G. (2017). Estimation of methylene blue index in oil sands tailings using hyperspectral data. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 95(1), 92–99. <https://doi.org/10.1002/cjce.22644>
- Entezari, Iman, Rivard, B., Vajihinejad, V., Wilson, W. G., Soares, J. B. P., Fisseha, B., & Beier, N. (2019). Monitoring tailings flocculation performance using hyperspectral imagery. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 97(9), 2465–2471. <https://doi.org/10.1002/cjce.23493>
- Gevaux, L. (2020). *3D-hyperspectral imaging and optical analysis of skin for the human face To cite this version : HAL Id : tel-02881115 Lou GEVAUX 3D-hyperspectral imaging and optical analysis of skin for the human face In front of the jury composed by :*
- Gondek, J. S., Meyer, G. W., & Newman, J. G. (1994). Wavelength dependent reflectance functions. *Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1994*, 213–220. <https://doi.org/10.1145/192161.192202>
- Hassan-Esfahani, L., Torres-Rua, A., Jensen, A., & McKee, M. (2015). Assessment of surface soil moisture using high-resolution multi-spectral imagery and artificial neural networks. *Remote Sensing*, 7(3), 2627–2646. <https://doi.org/10.3390/rs70302627>
- NCh1515.Of79, Mecánica de suelos - Determinación de la humedad, (1999).
- Jones, D. (2014). *The Picamera Class*. Picamera. https://picamera.readthedocs.io/en/release-1.12/api_camera.html
- Muller, E., & Décamps, H. (2001). Modeling soil moisture - Reflectance. *Remote Sensing of*

- Environment*, 76(2), 173–180. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00198-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00198-X)
- Pedroza, V., Gutierrez, M., Roux, J. Le, Hernández, E., & Vasquez, J. P. (2015). Estudio Comparativo Del Coeficiente De Permiabilidad K En Mustras De La Formacion De Rio Pedregoso. *Congreso Geologico Chileno*, 238–240. https://biblioteca.sernageomin.cl/opac/DataFiles/14905_v2_pp_238_240.pdf
- Prudnikova, E., Savin, I., Vindeker, G., Grubina, P., Shishkonakova, E., & Sharychev, D. (2019). Influence of soil background on spectral reflectance of winter wheat crop canopy. *Remote Sensing*, 11(16). <https://doi.org/10.3390/rs11161932>
- Ramírez, N. (2007). Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Seguridad Minera*, 1–42.
- Rivera, D. (2012). *Estudio Experimental del Potencial de Infiltración de Relaves Espesados TTD Depositados Directamente sobre Suelos Naturales*.
- Sadeghi, M., Jones, S. B., & Philpot, W. D. (2015). A linear physically-based model for remote sensing of soil moisture using short wave infrared bands. *Remote Sensing of Environment*, 164(January), 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.04.007>
- Sadeghi, M., Jones, S. B., & Tuller, M. (2015). Toward a Calibration-Free Model for Optical Remote Sensing of Soil Moisture. *AGU Fall Meeting, December, DECEMBER*, 1–2. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1963.4004>
- Sadeghi, M., Sheng, W., Babaeian, E., Tuller, M., & Jones, S. B. (2017). High-Resolution Shortwave Infrared Imaging of Water Infiltration into Dry Soil. *Vadose Zone Journal*, 16(13), 1–10. <https://doi.org/10.2136/vzj2017.09.0167>
- SERNAGEOMIN. (2020). *Catástro de Depósitos de Relaves en Chile*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Seguridad Minera. <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>
- SERNAGEOMIN, C. (2003). *Construcción y operación de tranques de relaves*. 14.
- Simms, P., Dunmola, A., Fisseha, B., & Bryan, R. (2010). Generic modelling of desiccation for cyclic deposition of thickened tailings to maximise density and to minimise oxidation. *Proceedings of the Thirteenth International Seminar on Paste and Thickened Tailings*, 293–301. https://doi.org/10.36487/acg_rep/1063_25_simms
- Simms, P., Grabinsky, M., & Zhan, G. (2007). Modelling evaporation of paste tailings from the Bulyanhulu mine. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(12), 1417–1432. <https://doi.org/10.1139/T07-067>
- SRK. (2012). *Estudio Infiltración de Relaves Minera Esperanza Estudio Infiltración*.
- Taktikou, E., Bourazanis, G., Papaioannou, G., & Kerkides, P. (2016). Prediction of Soil Moisture from Remote Sensing Data. *Procedia Engineering*, 162, 309–316. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.066>
- Thomasson, J. A., Sui, R., & Cox, M. S. (2001). *Soil reflectance sensing for determining soil properties in precision agriculture*. 44(6), 1445–1453.
- Tsukamoto, Y., Kawabe, S., Matsumoto, J., & Hagiwara, S. (2014). Cyclic resistance of two unsaturated silty sands against soil liquefaction. *Soils and Foundations*, 54(6), 1094–

1103. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2014.11.005>
- Villavicencio, A. G., Breul, P., Bacconnet, C., Boissier, D., & Espinace, A. R. (2011). Estimation of the Variability of Tailings Dams Properties in Order to Perform Probabilistic Assessment. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(6), 1073–1084. <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9438-5>
- Weidong, L., Baret, F., Xingfa, G., Bing, Z., Qingxi, T., & Lanfen, Z. (2003). Evaluation of methods for soil surface moisture estimation from reflectance data. *International Journal of Remote Sensing*, 24(10), 2069–2083. <https://doi.org/10.1080/01431160210163155>
- Wright, S. P., Walden, P. J., Sangha, C. M., & Langdon, N. J. (1996). Observations on soil permeability, moulding moisture content and dry density relationships. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 29(3), 249–255. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEGH.1996.029.P3.08>

ANEXOS

A.1 Estudio de la Luz

La luz corresponde a energía radiante con propiedades duales de comportamiento de onda y partícula que es capaz de transportarse por el vacío y por medios físicos, la cual permite visualizar superficies en las que incide, en función de las características físicas y químicas, fenómeno que es dependiente del rango espectral de luz (Brauers & Aach, 2006).

Para poder analizar las propiedades o efectos de la luz es necesario definir conceptos previos, en función de magnitudes radiométricas (*), las cuales incluyen la energía en todo el espectro y magnitudes fotométricas (*), las cuales se presentan a continuación:

- **Ángulo sólido (Ω):** Corresponde a cada una de las partes de un cono que divide el espacio, tal como se muestra en Fig. 0-1, quedando definido por Ec. (1) en unidades de estero-radianes (sr).

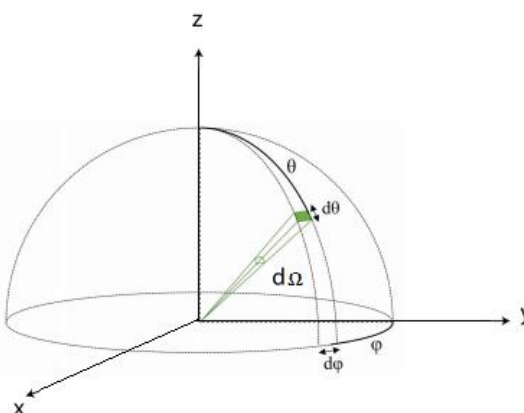


Fig. 0-1: Esquema que representa el ángulo sólido.
Fuente: Modificado de Gevaux, 2020.

$$\Omega = \int \sin(\theta) d\theta d\phi \quad (\text{Ec. 1})$$

- **Energía radiante (Q):** Energía total emitida, transmitida o absorbida por un cuerpo, medida en unidades de Joule (J).
- **Flujo radiante (φ_e):** Corresponde a energía radiante por unidad de tiempo el cual es emitido, refractado o reflectado por un objeto, medido en unidades de Watts (W), más conocido como potencia, la cual queda definida por Ec. (2), medida en sistema radiométrico.

$$\varphi_e = \frac{Q}{t} \quad (\text{Ec. 2})$$

- Flujo luminoso (φ_v): Es el equivalente de flujo radiante en unidades fotométricas, y se mide en lumen (lm).
- Intensidad radiante (I_e): Flujo radiante transportado en una dirección dada en un ángulo sólido, el cual es medido en unidades de W/sr, definido por Ec. (3).

$$I_e = \frac{\varphi_e}{\Omega} \quad (\text{Ec. 3})$$

- Intensidad luminosa (I_v): Equivalente a intensidad radiante en magnitudes fotométricas, medido en unidades de lm/sr, también conocida como candela (cd), representado por Ec. 4.

$$I_v = \frac{\varphi_v}{\Omega} \quad (\text{Ec. 4})$$

- Radiancia (L_e): Flujo radiante que sigue un ángulo sólido dado. Es usada para cuantificar la cantidad de luz o “brillo” de una superficie, lo que lleva a tener mayor radiancia a mayor flujo radiante. La radiancia queda definida por Ec. (5), y se mide en W/m²sr.

$$L_e = \frac{\varphi_e}{\Omega \cos \theta A} \quad (\text{Ec. 5})$$

, donde A es el área de la superficie receptora y θ el ángulo de incidencia respecto a la vertical.

- Luminancia (L_v): Equivalente de radiancia en sistema fotométrico, el cual se mide en unidades de lm/m²sr, definido por Ec. (6).

$$L_v = \frac{\varphi_v}{\Omega \cos \theta A} \quad (\text{Ec. 6})$$

- Irradiancia (E_e): También llamada densidad de flujo, y corresponde al flujo radiante recibido en una superficie por unidad de área (W/m²). Queda definido por Ec. 7.

$$E_e = \int_{2\pi-} L_e(\Omega) |\cos(\theta)| d\Omega \quad (\text{Ec. 7})$$

- Iluminancia (E_v): Equivalente de irradiancia en sistema fotométrico, el cual se mide en unidades de lm/m^2 , definido por Ec. (8).

$$E_v = \int_{2\pi-} L_v(\Omega) |\cos(\theta)| d\Omega \quad (\text{Ec. 8})$$

- Reflectancia (ρ): Cantidad de flujo radiante reflejado en una superficie, normalizado por el flujo incidente, como se muestra en Fig. 0-2. La reflectancia es un indicador de la capacidad que tiene un material para reflejar la luz y es adimensional, como se muestra en Ec. (9).

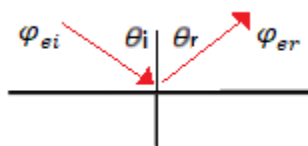


Fig. 0-2: Haz de luz reflejado.

$$\rho = \frac{\varphi_{er}}{\varphi_{ei}} \quad (\text{Ec. 9})$$

- Transmitancia (τ): Cantidad de flujo radiante transmitido por una superficie, normalizado por el flujo de luz incidente, proceso observado en Fig. 0-3. La Transmitancia es un indicador de la capacidad que tiene un material para transmitir la luz y es adimensional, representado en Ec. (10).

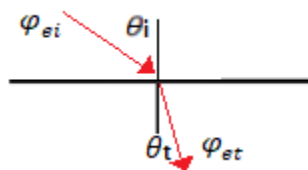


Fig. 0-3: Haz de luz transmitido.

$$\tau = \frac{\varphi_{et}}{\varphi_{ei}} \quad (\text{Ec. 10})$$

- Absorción (α): Cantidad de flujo de luz absorbida por el material en el cual la luz ha sido refractada, normalizada por la luz incidente, por lo que es adimensional, como se muestra en Ec. (11), y de forma esquemática representada en Fig. 0-4.

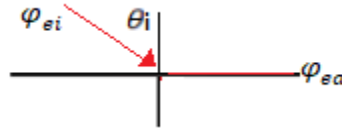


Fig. 0-4: Haz de luz absorbido.

$$\alpha = \frac{\varphi_{ea}}{\varphi_{ei}} \quad (\text{Ec. 11})$$

- Ecuación de continuidad: La sumatoria de reflectancia, transmitancia y flujo absorbido, debe ser igual a 1, tal que exista continuidad de flujo, como se muestra en Ec. (12).

$$1 = \alpha + \rho + \tau \quad (\text{Ec. 12})$$