



Monitoreo de la humedad en depósitos de relave a partir de mediciones de reflexión de luz

Monitoring of tailings water content using light reflection measurements

Fecha de entrega: 3 de diciembre 2018

Fecha de aceptación: 28 de marzo 2019

Víctor Araya¹, Gonzalo Suazo¹, Gabriel Villavicencio² y Matías Silva¹

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Avenida España 1680, Valparaíso, Chile, victor.arayan@usm.cl, gonzalo.suazo@usm.cl, matias.silvai@usm.cl

² Grupo de Geotecnia, Escuela de Ingeniería en Construcción, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Avenida Brasil 2147, Valparaíso, Chile, gabriel.villavicencio@pucv.cl (Orcid: 0000-0002-5342-0063)

Los depósitos de relaves son estructuras únicas, que están en continuo crecimiento y cuya operación tiene un impacto directo en el proceso de extracción de minerales, y por tanto, en el negocio minero. Para optimizar la operación de los depósitos, así como para evaluar su estabilidad física-química, es necesario monitorear de manera continua variables críticas como: rigidez, contenido de agua, densidad, etc. Estas variables presentan una gran variabilidad espacial y temporal, por lo que el monitoreo es una necesidad de operaciones mineras modernas. Una de las estrategias de monitoreo que ha ganado gran aceptación en años recientes es la utilización de tecnologías de monitoreo remoto, las cuales muestran ventajas frente a las técnicas convencionales de monitoreo in situ, debido a que permiten obtener información con mayor periodicidad en áreas de gran extensión. En este sentido, el análisis de imágenes satelitales se utiliza hoy en día para caracterizar movimientos de la estructura o para evaluar cambios en su geometría. Una tecnología poco investigada o utilizada corresponde al uso de imágenes espectrales, las que tienen un gran potencial en la determinación de variables como densidad, temperatura, humedad, entre otras. En este sentido, el presente artículo evalúa el uso de imágenes hiperespectrales para la caracterización de humedad en la superficie de depósitos de relaves espesados. Se presentan pruebas en laboratorio y pruebas de campo en un depósito de relaves. Las imágenes fueron tomadas en un depósito del norte de Chile con cámaras RGB e hiperespectrales montadas en un dron.

Palabras clave: imagen espectral, relaves, monitoreo remoto, humedad superficial, reflectancia

Tailings storages facilities are constructed over a period of years or even decades where their operation has a direct impact on the extraction and milling of minerals, and therefore, in the global mining business. To optimize the operation of the facilities, as well as to evaluate their physical and chemical stability, it is necessary to continuously monitor critical variables such as: material's stiffness, water content, density, etc. These state variables show great spatial and temporal variability, and thus, monitoring is needed in all modern operations. One of the monitoring strategies that has gained great acceptance in recent years is the use of remote monitoring techniques. This approach allows to obtain relevant information more frequently, at lower costs, and in larger areas when compared to field testing. In this context, the analysis of satellite images is used in tailings engineering to characterize retaining wall movements and the evolution of its geometry (volume). The use of spectral images captured by satellites, however, has been scarcely used to characterize other significant variables such as tailings density, temperature, moisture, among others. Regarding this, the present article explores the use of hyperspectral images for the characterization of the moisture content on the surface of a thickened tailings facility located in northern Chile. Laboratory and field tests are presented.

Keywords: spectral image, tailings, monitoring, surface moisture, reflectance

Introducción

La principal estrategia adoptada a nivel mundial para la gestión de relaves ha sido la construcción de grandes presas de relaves. El diseño de estas estructuras ha mejorado significativamente en las últimas décadas como resultado de la experiencia y avances en investigación aplicada. Sin embargo, aún existen una serie de incertidumbres ambientales y geomecánicas asociados a la respuesta de estas estructuras. Un claro ejemplo de la ocurrencia de fenómenos poco caracterizados es la falla del depósito de Bento Rodrigues, donde fenómenos de extrusión (sumado a problemas de construcción) gatillaron una falla masiva (Hatje *et al.*, 2017). Los riesgos ambientales y económicos asociados a fallas catastróficas, sumado a una mayor recuperación de agua y menor impacto medioambiental, han llevado a la industria a cambiar gradualmente hacia la disposición espesada de relaves. Resulta claro que la mayoría de las ventajas de depósitos de relaves espesados radican en los beneficios de la disposición con alto contenido de sólidos y de los procesos de desaturación del material. En este contexto, existe una regla práctica entre ingenieros de relaves que indica que permitir el secado de los relaves más allá del límite de contracción evitaría, entre otras cosas, el riesgo de deformación significativa (*i.e.* movilidad cíclica) del depósito durante eventos sísmicos. Esta regla es utilizada también por muchos ingenieros como un criterio para planificar la secuencia de disposición de relaves (zonas de descarga). Considerando lo anterior, es pertinente preguntarse: ¿es posible monitorear el contenido de agua del depósito de modo de optimizar la operación (recuperación de agua) y evaluar su estabilidad física?. Una de las respuestas a esta pregunta, según se explora en este artículo, es el uso de imágenes hiperespectrales.

El uso de análisis digital de imágenes es una técnica atractiva para el monitoreo en comparación con las mediciones in situ que pueden ser costosas y exhaustivas. Tales técnicas han tenido un desarrollo explosivo en la última década, de la mano de los avances en investigación en agronomía para el monitoreo de plantas y la salud de los cultivos (Hassan-Esfahani *et al.*, 2015). La detección remota térmica y óptica (visible e infrarroja) ha demostrado ser un predictor de la humedad de suelos naturales. Por ejemplo, el uso del índice de vegetación de diferencia normalizada

NDVI ha mostrado resultados prometedores al diferenciar el suelo desnudo de la hierba, o al detectar plantas bajo estrés (Taktikou *et al.*, 2016). Si el contenido de agua se puede estimar con precisión en depósitos de relaves, también se pueden estudiar otras variables o fenómenos, por ejemplo, balance de agua, tasas de evaporación y riesgo de licuefacción. Para lo anterior se requiere no solo de la variable monitoreada, sino que también de un conocimiento avanzado del comportamiento geotécnico de la estructura.

Este artículo presenta el desarrollo de la tecnología de monitoreo del contenido de agua de relaves mediante el análisis de imágenes hiperespectrales capturadas por vehículos aéreos no tripulados (UAV o dron). Los resultados numéricos se comparan con mediciones de laboratorio y de pruebas realizadas in situ en un depósito de relaves espesados del norte de Chile.

Descripción general

Las características físicas y químicas de un material pueden ser analizadas mediante un análisis espectral con ondas electromagnéticas. Estas técnicas son utilizadas por ejemplo en astronomía para estudiar la composición de la superficie de planetas lejanos o en mineralogía para estudiar la composición química de algún material. El espectro de ondas electromagnéticas se divide en una serie de grupos, dentro de las que se destacan los rangos ultravioleta, visible, infrarrojo y microondas como se presenta en la Figura 1.

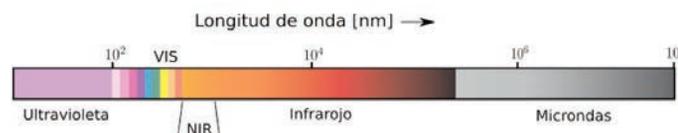


Figura 1: Espectro de ondas electromagnéticas

Cada material responde en forma diferente frente a la iluminación en las distintas bandas, por ejemplo, el rango de infrarrojo entre los 3000 a 8000 nm (LWIR) es correlacionado con la temperatura de un cuerpo. Es posible estudiar la humedad de un suelo en el rango cercano al infrarrojo (NIR) y en el rango visible de luz (VIS) (Dalal, 1986). La luz proveniente del sol, que tiene energía en todo

el rango de longitud de ondas, es reflejada en el material y captada por las cámaras utilizadas. En este punto, las cámaras convencionales, dividen la luz en 3 bandas: Roja (R), Verde (G) y Azul (B) como se presenta en la Figura 2.

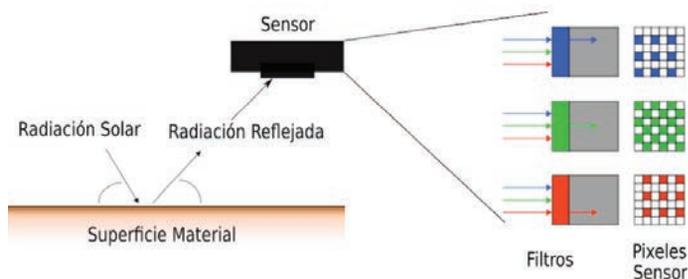


Figura 2: Esquema de reflexión y captura en un sensor de cámara convencional

Cada una de las bandas o canales tienen una función de transferencia espectral, lo cual se presenta esquemáticamente en la Figura 3.

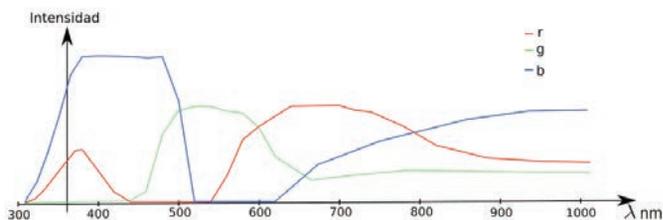


Figura 3: Función de transferencia espectral en canales de cámara

Al integrar la luz incidente $I_l(\lambda)$ en la cámara con la función de transferencia de cada canal r, g, b en todo el espectro de longitudes de onda, se obtiene un valor R, G, B de color para cada píxel.

$$(R, G, B) = \int_{-\infty}^{\infty} I_l(\lambda)[r(\lambda), g(\lambda), b(\lambda)]d\lambda \quad (1)$$

La reflexión en un determinado suelo depende de su estructura física, de la composición mineralógica, sus parámetros de estado, de la rugosidad de la superficie y de la forma de iluminación. El contenido de agua es un parámetro de estado, entonces, si las otras características son relativamente fijas, como es posible de esperar en un depósito de relaves, se podría esperar que exista una relación entre la reflexión y la humedad del material (Entezari *et al.*, 2013).

Metodología

Pruebas de laboratorio

Los primeros estudios se realizaron en el Laboratorio de Geotecnia de la UTFSM, donde se prepararon muestras de relave de cobre a distintos contenidos de sólidos iniciales, en ejemplares de 5 cm de diámetro y 2 cm de alto (bajo la hipótesis de reflexión infinita). Las muestras se secaron en intervalos regulares a una temperatura de 50°C y posteriormente iluminadas con luz solar y con luz a una determinada longitud de onda. La luz reflejada, fue capturada luego mediante dos cámaras: una para el rango visible de la luz (VIS, longitudes de onda de 400 a 700 nm), y otra para el rango infrarrojo cercano (NIR, longitudes de onda de 400 a aproximadamente 1100 nm). Adicionalmente, junto a las muestras se ubicó una tabla de Macbeth ColorChecker, como se presenta en la Figura 4. Esta tabla se utilizó para normalizar la iluminación solar en los distintos días y horas de captura de información.

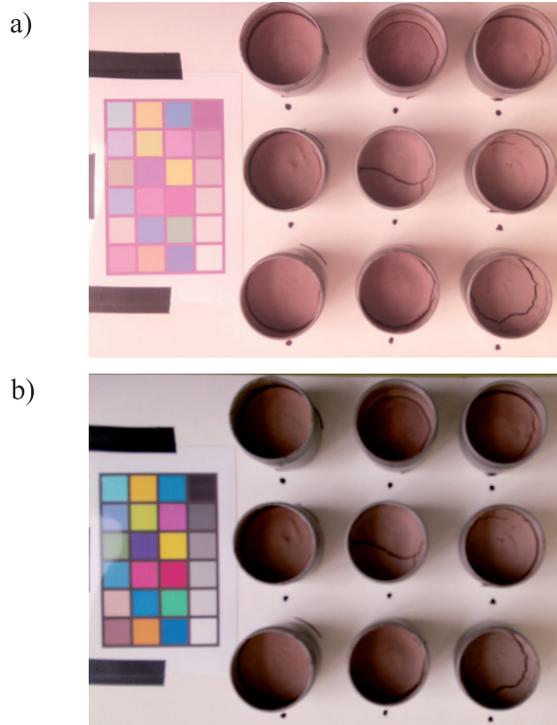


Figura 4: Distribución de muestras y tabla colores de referencia, a) imagen con cámara NIR y b) imagen con cámara VIS

Adicional a la estrategia con iluminación ambiental, se utiliza iluminación activa a diferentes longitudes de onda (405 nm, 532 nm, 650 nm, 980 nm). Es importante mencionar que los espectros correspondientes a estas

fuentes tienen un espectro bastante estrecho, lo cual se esquematiza en la Figura 5. Esta idea permite analizar bandas más específicas como se obtendría con espectrómetros de alto costo (Weidong *et al.*, 2002).

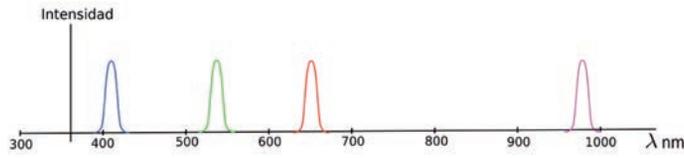


Figura 5: Espectro de iluminación láser (azul 405 nm, verde 532 nm, rojo 650 nm e infrarrojo 980 nm)

Los distintos días y horas de muestreo tienen variaciones en la intensidad de la luz ambiental en las distintas longitudes de onda, por lo cual se utilizó una normalización respecto a una imagen patrón, en este caso la tabla Macbeth ColorChecker. En la Figura 6 se presenta un ejemplo de las intensidades en los 18 colores que hacen referencia al espectro de luz visible para los 3 canales de la cámara NIR.

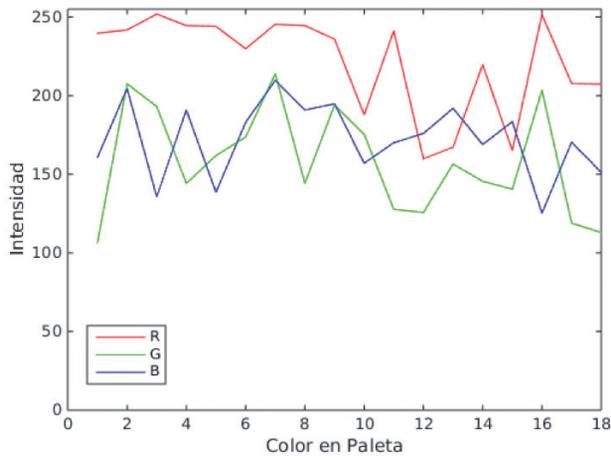


Figura 6: Esquema tabla de referencia para normalización de iluminación.

Considerando PI como un índice de la potencia total espectral, obtenida como la suma de las intensidades en los 18 recuadros de colores de la paleta de referencia:

$$PI = \sum_{n=1}^{n=18} I_n \quad (2)$$

donde I_n representa la intensidad para cada uno de los 18 colores de la tabla. Utilizando un día de referencia, es posible normalizar la intensidad de reflexión en las muestras de suelo por el factor E :

$$E = \left(\frac{\sum_{n=1}^{n=18} I_{n,ref}}{\sum_{n=1}^{n=18} I_n} \right)^\alpha \quad (3)$$

donde $I_{n,ref}$ es la intensidad para los 18 colores de la tabla para el día de referencia y α es un factor de ajuste. Con este factor E es posible reducir las variaciones de intensidad asociadas a los distintos días y horas de los días de prueba. La intensidad en las muestras de suelo se obtiene según:

$$I_s = I_s E \quad (4)$$

donde I_s es la intensidad de luz reflejada en el suelo corregida por la potencia espectral de referencia. Para obtener medidas estandarizadas, se divide la intensidad por la reflexión en el suelo seco I_{ss} según:

$$I_{sn} = \frac{I_s}{I_{ss}} \quad (5)$$

Adicionalmente, para este estudio se utilizó el índice NDVI, con lo cual se busca eliminar la reflexión en el rango visible al restar lo obtenido con la cámara NIR y VIS. Este es un índice que no tiene significado físico pero como se presenta en los resultados ayuda en la predicción del contenido de agua.

$$NDVI_j = \left(\frac{I_{j,NIR} - I_{j,VIS}}{I_{j,NIR} + I_{j,VIS}} \right) \quad (6)$$

donde $I_{j,VIS}$ es la intensidad en el canal R, G, B en la cámara VIS y $I_{j,NIR}$ es la intensidad en los canales R, G, B pero en la cámara NIR.

Pruebas de campo

Se realizó una campaña de campo para caracterizar los contenidos de agua superficial en un depósito de relaves espesados de superficie aproximada 10 Ha. Se realizaron mediciones directas de humedad mediante recuperación de material superficial y posterior traslado de muestras al laboratorio. A esto se suma la captura de imágenes de modo de validar el rendimiento de la tecnología para la predicción de humedades. El depósito se encuentra en el norte de Chile y almacena relaves con un contenido promedio del 70% del contenido de sólidos. Durante la campaña, se capturaron una serie de imágenes VIS y

NIR utilizando un UAV. Se siguieron trayectorias de vuelo predeterminadas, lo que facilitó la construcción del ortomosaico. Las cámaras utilizadas en terreno son similares a las utilizadas en el laboratorio. A continuación se presenta una discusión de los resultados obtenidos.

Resultados Laboratorio

Las mediciones de reflexión fueron obtenidas en un rango de humedades de 0 a 140%, con una humedad de saturación de 38%. En la Figura 7 se presentan los resultados obtenidos para la iluminación ambiental captada en los distintos canales (R, G y B). En las Figuras 7a y 7b se presentan la intensidad de reflexión normalizada respecto al suelo seco obtenidas con las cámaras NIR y VIS, respectivamente. Se observa que, para bajas humedades, la reflexión disminuye con el aumento de humedad, mientras que desde un cierto punto de humedad, de aproximadamente $w^*=17\%$, el comportamiento se invierte lo que se atribuye a los efectos de la continuidad de la fase líquida en la reflexión. Adicionalmente en la Figura 7c se presentan los resultados para el índice NDVI, donde se observa que para la humedad w^* se genera un quiebre en la curva y el índice se mantiene relativamente constante después de esta humedad (en un valor I^*). Este fenómeno de saturación del índice NDVI, es propio del mismo y este comportamiento permite complementar las intensidades de reflexión normalizadas, diferenciando el rango de trabajo, ya sea sobre o bajo w^* . En la Tabla 1 se presentan las correlaciones obtenidas en los distintos tramos de ajuste con curvas parabólicas y cúbicas con sus respectivos índices de correlación R^2 .

En la Figura 8 se presentan los resultados equivalentes para la iluminación activa con láser infrarrojo de longitud 980 nm. Se observa un comportamiento similar en la Figura 8a, pero en este caso no se requiere de correcciones por iluminación ambiental. Por otro lado, el índice NDVI

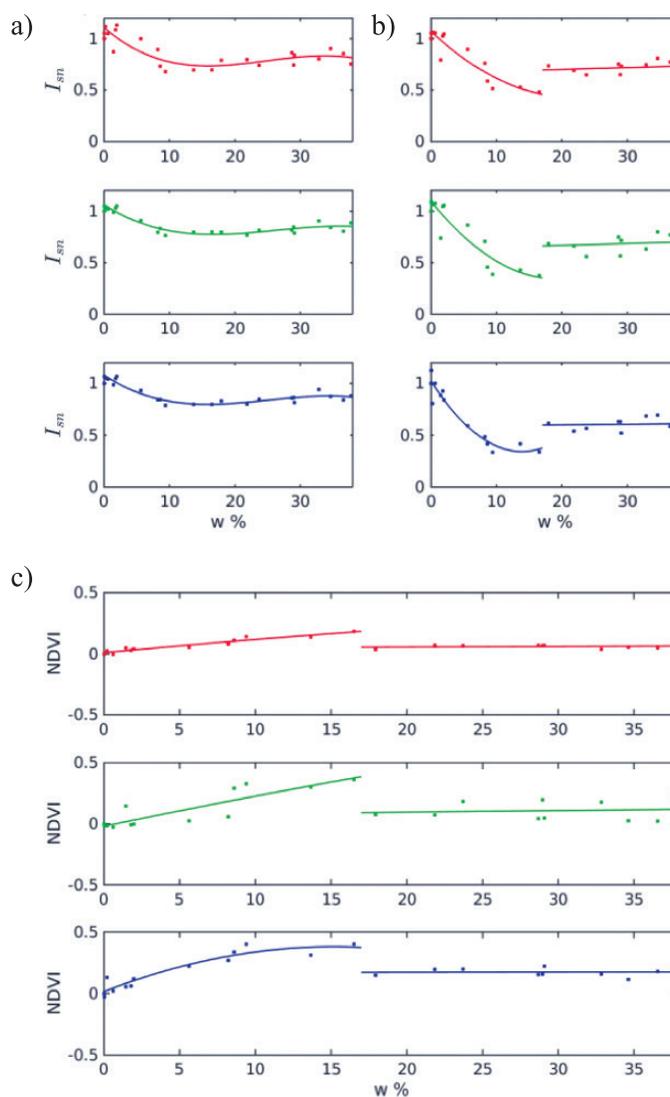


Figura 7: Índices para iluminación ambiental, a) cámara NIR, b) cámara VIS y c) índice NDVI

mostrado en la Figura 8b tiene un buen comportamiento solo en el rango bajo la humedad w^* (Tramo I). Posteriormente tiende a mantenerse en torno a un valor de saturación, pero con una mayor dispersión. Adicionalmente en la Figura 8a se observa un comportamiento diferente para humedades mayores a la de saturación ($>38\%$) o Tramo II. Para este

Tabla 1: Correlaciones para iluminación ambiental

Canal	NIR					VIS				NDVI				
	a	b	c	d	R^2	a	b	c	R^2	a	b	c	R^2	I^*
R	0,0000	0,0026	-0,0553	1,1083	0,74	0,0013	-0,0584	1,0680	0,86	-0,0001	0,0114	0,0102	0,92	0,05
G	0,0000	0,0018	-0,0411	1,0626	0,89	0,0020	-0,0783	1,0934	0,84	-0,0001	0,0260	-0,0196	0,75	0,09
B	0,0019	0,0019	-0,0418	1,0800	0,90	0,0035	-0,0976	1,0204	0,92	-0,0016	0,0483	0,0154	0,89	0,17

rango de humedad las muestras presentaban una capa de agua por sobre su superficie. Se observa que mientras más alta es la capa de agua menor es la reflexión en el rango infrarrojo. Esta información puede ser de utilidad práctica para la obtención de la profundidad del claro de agua en TTDs mediante monitoreo remoto.

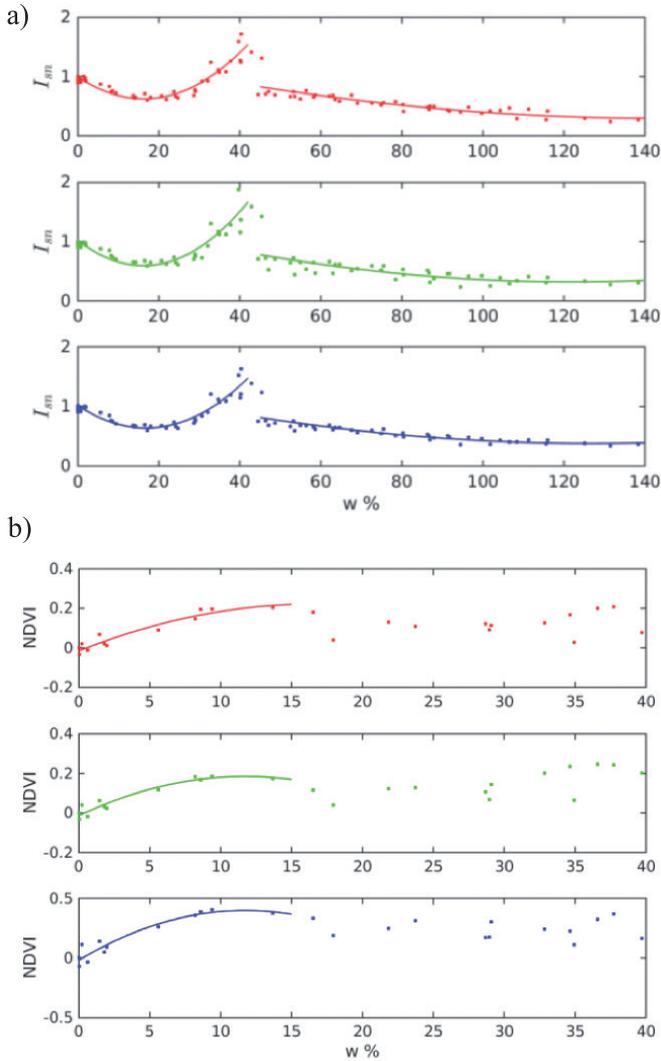


Figure 8: Índices de iluminación activa láser 980 nm, a) cámara NIR y b) índice NDVI

En la Tabla 2 se presentan las correlaciones obtenidas en los distintos tramos con curvas parabólicas con sus respectivos índices de correlación (R^2).

A partir de la combinación de ambos gráficos en iluminación activa es fácilmente obtenible la humedad del suelo. Del mismo modo, investigación reciente ha permitido a los autores probar correlaciones entre el valor de w^* y propiedades de retención de agua de los materiales. Del mismo modo, se han realizado investigaciones sobre el potencial de la iluminación activa para determinar la ocurrencia de drenaje ácido en laboratorio, así como para la caracterización de minerales remanentes en relaves. A continuación, se presenta la aplicación de la tecnología a un depósito de relaves espesados.

Resultados de campo

En general, el índice NDVI, tal como se encuentra en las imágenes de UAV, identifica claramente las áreas dentro del TTD con alto contenido de agua. Por ejemplo, en la Figura 9, el color rojo representa un valor bajo del NDVI, es decir, zonas relativamente secas, mientras que las superficies en blanco muestran zonas cercanas a la saturación (relaves frescos).

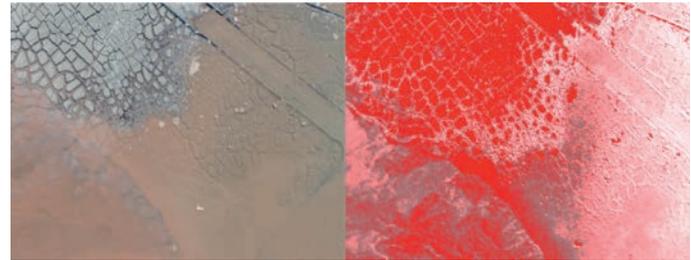


Figura 9: Contraste entre zona seca y saturada mediante la utilización de índice NDVI

En la Figura 10 se presenta la reflexión para una franja del depósito en estudio, partiendo desde una zona fresca en la parte inferior (representando por el color blanco

Tabla 2: Correlaciones para iluminación activa láser

Canal	Tramo I NIR				Tramo II NIR				NDVI			
	a	b	c	R^2	a	b	c	R^2	a	b	c	R^2
R	0,0014	-0,0456	0,9972	0,8580	0,0001	-0,0158	1,4300	0,7419	0,0014	-0,0456	0,9972	0,8580
G	0,0016	-0,0525	1,0224	0,7847	0,0001	-0,0190	1,4796	0,5481	0,0016	-0,0525	1,0224	0,7847
B	0,0013	-0,0450	1,0164	0,8526	0,0001	-0,0165	1,4247	0,7451	0,0013	-0,0450	1,0164	0,8526

en los distintos canales) y subiendo hasta una zona seca (representado por el color del canal). Las imágenes están ordenadas por VIS y sus 3 canales R, B y G, seguidas por la imagen NIR y sus 3 canales R, B y G para: a) una zona vertida hace pocos días y b) para una zona más seca.

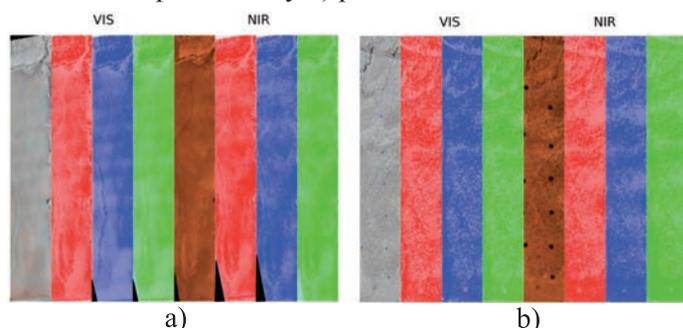


Figura 10: Comparación de reflexión en distintos canales para una franja del TTD, a) región fresca y b) región seca

Se observa en el caso mostrado en la Figura 10a un comportamiento similar en la transición de la zona húmeda a la seca en todos los canales (paso de blanco al color del canal). Mientras que para el caso mostrado en la Figura 10b se tiene un poco más de dispersión debido a las sales en superficie y al agrietamiento.

La medición de humedad in situ en 10 puntos dentro del depósito permite verificar que existe una fuerte correlación ($R^2 = 0.7$) con las humedades estimadas con imágenes espectrales. Las diferencias se atribuyen a la formación de sales, el posicionamiento GPS y el uso de cámaras comerciales con bandas parcialmente bloqueadas. Lo anterior es parte de una investigación que actualmente desarrollan los autores, que considera pruebas de campo en diversos depósitos de relave.

Conclusiones

En este artículo se explora la relación entre la reflexión de la luz sobre la superficie de depósitos de relave y su contenido de humedad. Los resultados obtenidos en términos de la intensidad de reflexión normalizada a suelo seco muestran una alta correlación, lo cual proporciona una tecnología precisa y costo-eficiente para la estimación de humedad. La utilización de luz activa a una longitud de onda dada (banda espectral estrecha) presenta una nueva alternativa atractiva dado que no depende de las condiciones de luz ambiental y tiene la capacidad de iluminar zonas a las cuales no tiene acceso la luz ambiental, por ejemplo, dentro de grietas. Los resultados obtenidos en el campo se

vieron afectados por los filtros empleados por las cámaras comerciales utilizadas y la significativa generación de una capa salina en la superficie que dificultó el análisis de las imágenes. Este trabajo se enmarca dentro del desarrollo de tecnologías desarrollado por la start-up GeoTailings al alero de la filial de innovación CodelcoTech.

Referencias

- Dalal, H. (1986). Simultaneous determination of moisture, organic carbon and total nitrogen by infrared reflectance spectrometry. *Soil Science Society of America* 50(1), 120-123
- Entezari, I., Rivard, B., Lipsett, M. and Wilson, W. (2013). Application of hyperspectral remote sensing in estimation of oilsands tailings water content. *5th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS)*, IEEE, 1-4.
- Hassan-Esfahani, L., Torres-Rua, A., Jensen, A. and McKee, M. (2015). Assessment of surface soil moisture using high-resolution multi-spectral imagery and artificial neural networks. *Remote Sensing* 7(3), 2627-2646
- Hatje, V., Pedreira, R.M., de Rezende, C.E., Schettini, C.A.F., de Souza, G.C., Marin, D.C. and Hackspacher, P.C. (2017). The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. *Scientific Reports* 7(1), 10706
- Taktikou, E., Bourazanis, G., Papaioannou, G. and Kerkides, P. (2016). Prediction of soil moisture from remote sensing data. *Procedia Engineering* 162, 309-316
- Weidong, L., Baret, F., Xingfa, G., Qingxi, T., Lanfen, Z. and Bing Z. (2002). Relating soil surface moisture to reflectance. *Remote Sensing of Environment* 81(2-3), 238-246