

Predicción del contenido de humedad de suelos expuestos a la intemperie para la capa de subbase usando simulación experimental en cámara climática

Prediction of moisture content of soils for the sub-base layer using experimental simulation in a climatic chamber

Fecha de entrega: 6 de agosto 2025

Fecha de aceptación: 1 de octubre 2025

Gonzalo Lema¹, Luis Merino¹, Sebastián Calderón¹ y Rafael Martínez²

¹ Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Civil, Edmundo Larenas 219, Concepción, Chile, glema2017@udec.cl, luis.merino@udec.cl (<https://orcid.org/0000-0003-4924-8771>), sebastian.calderon@udec.cl (<https://orcid.org/0000-0002-2565-521X>)

² Pangea Geotecnia, O'Higgins Poniente 77, Oficina 1707, Concepción, Chile, rafel.martinez@pangealtda.cl

Un contenido adecuado de humedad del suelo permite alcanzar su máxima densidad al ser compactado, mejorando la cohesión y estabilidad del suelo. En algunos suelos, el contenido óptimo es inferior al natural, lo que requiere su reducción mediante exposición a la intemperie. Sin embargo, esta desecación es estacional, siendo menor en meses de media estación. Determinar la tasa de desecación del suelo en cada estación permite planificar la construcción de caminos y la disponibilidad de suelo con humedad óptima. Este trabajo presenta un procedimiento para predecir la reducción de humedad del suelo a través de simulaciones experimentales en una cámara climática, considerando temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar. Los resultados permiten una planificación eficiente y sustentable de movimientos de terreno, optimizando la reutilización de suelos de excavación en proyectos de infraestructura vial y contribuyendo a la reducción del impacto ambiental y costos.

Palabras clave: reutilización de suelo, simulación climática, sustentabilidad, secado de suelo, humedad

An adequate soil moisture content allows the soil to reach its maximum density when compacted, improving soil cohesion and stability. In some soils, the optimal moisture content is lower than the natural moisture content, which requires its reduction through exposure outdoors. However, this desiccation is seasonal, being lower in mid-season months. Determining the soil desiccation rate in each season allows for planning road construction and ensuring the availability of soil with optimal moisture. This work presents a procedure for predicting soil moisture reduction through experimental simulations in a climatic chamber, considering temperature, relative humidity, wind speed, and solar radiation. The results allow for efficient and sustainable planning of earthworks, optimizing the reuse of excavated soil in road infrastructure projects and contributing to the reduction of environmental impact and costs.

Keywords: soil reuse, climate simulation, sustainability, soil drying, moisture

Introducción

El rápido desarrollo económico y el crecimiento de la población han impulsado la urbanización a niveles sin precedentes, particularmente en países en desarrollo. Este proceso está asociado con un aumento significativo en el consumo de recursos esenciales, como agua, tierra, energía y minerales (Huang *et al.*, 2010). A medida que crece la demanda de infraestructura, como vías de tren, construcción subterránea, caminos y urbanizaciones, se genera un

excedente de suelos excavados. La usual disposición de estos suelos en vertederos no solo es insostenible, sino que también presenta riesgos tanto ambientales como para la salud humana, haciendo imperativo explorar estrategias que minimicen el desperdicio de suelo y optimicen su reutilización (Hale *et al.*, 2021).

A pesar de los avances en la gestión de residuos, la evaluación ambiental y económica de las distintas

alternativas de disposición de suelos y rocas excavadas sigue siendo un área poco explorada (Wang *et al.*, 2024). A medida que se expande la infraestructura subterránea y los proyectos de movimiento de tierra, los materiales excavados, como el suelo y la roca, se han convertido en la principal fuente de residuos de la industria de construcción y demolición (C&D). En algunas áreas urbanas, estos residuos representan más del 50% del total de residuos generados en la industria de C&D (Wang *et al.*, 2024). Este escenario resalta la necesidad urgente de optimizar su transporte y disposición, dado los elevados costos y los significativos impactos ambientales asociados (Gan y Cheng, 2015). Un desafío clave en la reutilización de suelos excavados es el manejo de su contenido de humedad, un parámetro fundamental en su viabilidad para futuros usos (Liu *et al.*, 2020). La humedad del suelo influye en su consistencia, especialmente en aquellos con alto porcentaje de finos. Suelos cuya humedad excede el límite plástico máximo, se comportan de manera fluida, mientras que aquellos por debajo del límite de plasticidad mínima se vuelven quebradizos, afectando su capacidad de soporte de carga y compactación (López-Lara *et al.*, 2017). Este problema es particularmente agudo en suelos con alta humedad, que no pueden ser utilizados directamente como relleno o material de estabilización, debido a la dificultad de compactación.

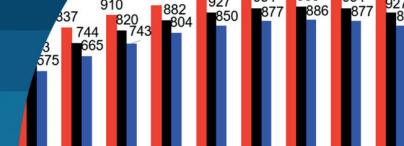
Diversas estrategias han sido propuestas para mejorar las propiedades de suelos con alta humedad. Una de ellas es la mezcla del suelo con estabilizante como cemento y cal, lo cual puede mejorar su capacidad portante y sus propiedades higroscópicas (Hale *et al.*, 2021). Sin embargo, otra opción emergente y más sostenible es el secado del suelo utilizando la radiación solar como fuente de energía para este proceso. Esta técnica se ha aplicada exitosamente en la solarización de suelos, un proceso que desinfecta el suelo mediante el aumento de su temperatura y la reducción de su humedad por exposición a radiación solar y altas temperaturas (McQuillan *et al.*, 2024). Este método de secado es de particular interés por su bajo impacto ambiental.

El secado solar depende de una serie de factores que afectan la transferencia de calor al suelo, como la estructura del suelo, su textura y su contenido de humedad inicial del suelo. La radiación solar, más que la temperatura

ambiental, es el principal factor que influye en el aumento de la temperatura del suelo, y consecuente pérdida de humedad (McQuillan *et al.*, 2024). En este contexto, la latitud juega un rol crucial en términos de intensidad de radiación solar, siendo América Latina, y en particular el norte de Chile, una región privilegiada por recibir una de las mayores intensidades de radiación solar del mundo (Cordero *et al.*, 2023).

Por último, estudios recientes han investigado el potencial de reutilización de suelos excavados como material de subbase en proyectos de infraestructura (Zhan *et al.*, 2023). En este estudio, el suelo (con un alto contenido de arcillas) es mezclado húmedo con un estabilizador, para luego ser secado controlando la temperatura del lugar de almacenamiento y protegiéndolo del agua, disponiendo el suelo para generar una gran extensión de área, siendo volteado a intervalos de tiempos regulares para incrementar el contacto con las partículas de aire, mejorando la reducción de humedad. Tras dos días de exposición, los suelos lograron reducir su humedad en un 6% (con una humedad inicial de 46%), lo que permitió su utilización exitosa como material de subbase con resultados de CBR entre el 5% a 10%. Estos resultados demuestran el potencial de los suelos excavados para su exitosa utilización en proyectos de construcción.

Por lo anterior, este estudio presenta una metodología experimental innovadora para predecir la evolución de humedad en suelos de estabilización expuestos a la intemperie durante estaciones del año de alta radiación solar, con el objetivo de facilitar su reutilización en proyectos de infraestructura vial. Se realizaron simulaciones experimentales representativas de condiciones climáticas de días medios de los meses de febrero, marzo y octubre, considerando parámetros clave como temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar. Los resultados obtenidos ofrecen una adecuada predicción de la evolución de humedad, lo que permite una planificación más eficiente y sostenible en el manejo de movimientos de tierra. Esta estrategia optimiza la reutilización de suelos en proyectos de infraestructura vial, contribuyendo a la reducción de impacto ambiental y costos en las fases constructivas.



Metodología

Como se mencionó, se busca disminuir la humedad del suelo hasta una condición de humedad objetivo (H_{obj}) a través de exponerlo a condiciones ambientales características de una determinada zona. Por lo mismo, el estudio se centró en determinar cuántos días de exposición son necesarios para que muestras de suelo alcancen la H_{obj} en distintas épocas del año. Además, el estudio también abordó cómo métodos mecánicos de mezclado pueden afectar la velocidad de secado. Las muestras se obtuvieron de una faena minera en la región del Bío Bío, con una humedad inicial de 21% aproximadamente. Este valor corresponde al contenido máximo de humedad que se requiere para que el suelo estudiado posea suficiente capacidad soportante y de compactación para ser empleado en faenas mineras estándar. En este sentido, alcanzar dicha humedad es crucial para permitir la compactación y el uso del suelo en proyectos de estabilización.

Control de variables ambientales

La simulación experimental de las condiciones ambientales se realizó en la cámara climática del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Concepción, mostrada en la Figura 1. Se reprodujeron cuatro variables ambientales que influyen en la evolución del contenido de humedad del suelo: temperatura ambiental, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento. Debido a que las muestras fueron obtenidas en la región del Bío Bío, las condiciones ambientales simuladas fueron representativas de esta misma zona. Para cumplir con esto se obtuvo información desde estaciones meteorológicas colindantes a la ciudad de Concepción (Dirección Meteorológica de Chile, DMC). A partir de dicha información, se caracterizó el perfil de variación a lo largo de día promedio para las



Figura 1: Cámara climática para controlar condiciones de: a) viento y humedad y b) radiación y calor

variables para determinados meses de interés del año. En particular, se identificaron las condiciones ambientales de los meses de octubre, febrero y marzo, los que coinciden con los períodos cercanos a la mayor proximidad del sol del hemisferio sur (mes de diciembre). El detalle de cada una de las variables se presenta en las siguientes secciones.

Temperatura y humedad relativa

Las condiciones higrotérmicas por replicar se obtienen del registro de datos históricos de temperatura y humedad ambiental de la DMC para estaciones colindantes a la ciudad de Concepción. Para las series de datos del año 2022, se obtuvo un promedio de perfil de variación horaria de día medio para cuatro meses: octubre, febrero y marzo. Los perfiles de variación determinados fueron luego simplificados por factibilidad técnica para la programación en la cámara climática. En consecuencia, el día medio de cada uno de los meses representados se representó con cuatro valores característicos de temperatura y seis valores característicos de humedad, obteniéndose los perfiles mostrados en las Figuras 2(a) y 2(b), respectivamente.

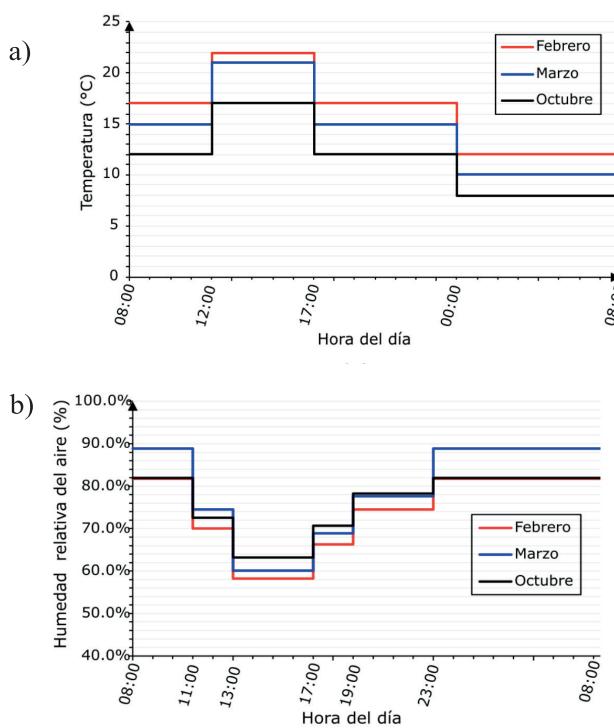


Figura 2: a) Perfil higrotérmico simulado para distintos meses de temperatura y b) humedad

Dentro de la cámara climática, la temperatura se modifica empleando equipos de refrigeración y calefacción

de aire, mientras que la humedad mediante equipos humidificadores y deshumidificadores (ver Figura 1). El sistema de la cámara climática controla las condiciones higrotérmicas de forma automática en función del perfil diario establecido en base a un PLC (programable logic controller) y monitorización por termocuplas y sensores de humedad.

Velocidad del viento

Para obtener el perfil de viento de la ciudad de Concepción, Chile, se realizó una campaña de medición de velocidad del viento (empleando un anemómetro) en distintos puntos de Concepción y a distintas alturas de medición. Se presentan los resultados de esta campaña en la Tabla 1, en donde se determina que la velocidad promedio del viento en la vecindad del suelo es del orden de 0.99 m/s. En función de estos resultados, la velocidad del viento se mantuvo constante durante el ensayo.

Dentro de la cámara climática, la velocidad del viento se simula mediante un equipo ventilador modificado para entregar un flujo laminar. La velocidad se controla manualmente mediante un anemómetro a la altura de la probeta de suelo a secar.

Tabla 1: Resumen velocidad de viento para distintas cotas de la ciudad de Concepción, Chile.

Altura de medición, m	0.00	0.50	1.00	1.50
Velocidad mínima, m/s	0.10	0.10	0.10	0.10
Velocidad máxima, m/s	2.30	3.20	3.60	4.30
Velocidad promedio, m/s	0.99	1.17	1.36	1.74
Desviación estándar, m/s	0.61	0.76	0.90	1.02

Radiación solar

La radiación solar característica de cada mes se estimó a partir de la intensidad de radiación solar que incide sobre la superficie terrestre en función de la posición de la Tierra en la órbita terrestre basada en datos reportados en Honsberg y Bowden (2019); la intensidad solar efectiva que atraviesa la atmósfera (aproximadamente 30%), y la corrección de altitud y posición terrestre de una superficie horizontal según el modelo de Honsberg y Bowden (2019).

Al aplicar este modelo de radiación, se obtienen el perfil de

radiación solar por hora a la que está expuesta la zona de estudio para los días medios de febrero, marzo y octubre (Figura 3), según la latitud de la ciudad de Concepción, Chile (36°S). Cabe destacar que también se corrigió la hora solar con la hora oficial del país empleando el modelo de Honsberg y Bowden (2019).

Al interior de la cámara climática, la simulación experimental del perfil de radiación solar se realizó utilizando un equipo capaz de generar radiación uniforme (Figura 1) y en el rango del espectro electromagnético de la luz visible del sol y del espectro de ondas largas. Este simulador solar consistía en ocho fuentes emisoras de luz halógenas de 4000 W, cuya radiación se concentraba usando un túnel de espejos, lo cual mejora la uniformidad de radiación solar incidente sobre la superficie del suelo a desecar. La radiación solar aplicada a las probetas de suelo se ajustaba modificando el número de fuentes emisoras y su distancia a la superficie del suelo. La radiación solar calculada es mostrada en la Figura 3, en la cual se ajustó al interior de la cámara climática usando un piranómetro que mide la radiación solar (W/m^2).

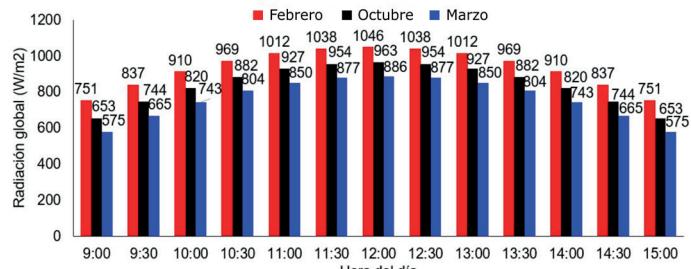
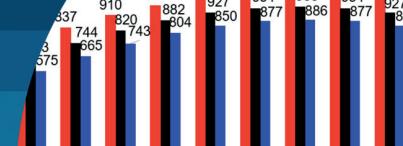


Figura 3: Perfil de radiación sobre el sitio de estudio en Concepción, Chile

Método mecánico de homogeneización del suelo

El estudio también abordó la influencia de métodos mecánicos para acelerar el secado del suelo en la probeta PF-V. En la literatura se ha reportado que este proceso se realiza mediante método de volteo (Zhan *et al.*, 2023), similar al efecto que podría ser un arador de vertedera en un sitio. Este proceso se compara con el escarificado, el cual consistía en revolver la probeta 3 veces durante las horas diurnas del proceso por 5 min con palas manuales, lo cual fue realizado por los mismos 2 operarios cada vez. Este proceso se podría asimilar a lo que realiza un escarificador industrial.



Cancha expuesta en terreno

Se dispone de una cancha de 2 m x 2 m, como se muestra en la Figura 4(a), con una profundidad de 30 cm. Se realiza un proceso de escarificado manual 3 veces durante las horas de exposición a radiación solar (Figura 4(b)), al igual que las probetas dispuestas en cámara climática.



Figura 4: a) Cancha expuesta y b) con material sometido a escarificado manual

Descripción de las probetas y método de control de humedad

Las probetas dentro de la cámara climática tenían una dimensión de 1 m x 1 m, como se muestra en la Figura 1, y una profundidad de 30 cm. Las dimensiones de estas probetas se establecieron en función de la factibilidad de la fuente de radiación solar.

El control de la humedad de cada probeta, en cámara climática o en terreno, se realiza mediante gravimetría. En cada medición k , se obtuvo una muestra de aproximadamente 500 g, cuya masa exacta ($m_{i,k}$) se determinó en una balanza. Luego esta muestra fue dispuesta en un horno a 100°C hasta alcanzar una masa constante ($m_{f,k}$). Luego la H_{BS} se calculó como la razón de la masa agua respecto a masa seca ($(m_{f,k} - m_{i,k}) / m_{f,k}$). Las mediciones se tomaron al inicio (08:00 AM) y al final (18:00 PM) del ciclo de radiación y antes de cada proceso de escarificación. En cada uno de dichos instantes, se extrajeron dos muestras de suelo a una profundidad aproximada de 15 cm. Cada ensayo concluyó cuando la probeta alcanzó la humedad objetivo del 17% en base seca (BS).

Resumen del programa experimental

El programa experimental consideró cinco muestras en total, tal como se resume en la Tabla 2. Como se identifica,

el mes de febrero se simuló en dos probetas, una con volteado como método de homogeneización y otra con escarificado. Estas probetas se codificaron como PC-F-V y PC-F-E, respectivamente. Los meses de marzo y octubre se模拟aron una vez cada uno en las probetas PC-M-V y PC-O-V, respectivamente, utilizando el escarificado como método de homogeneización en ambas. Además, se realizó una prueba en terreno para el mes de octubre, codificada como PT-O-E, también homogeneizada mediante escarificación, con el objetivo de comparar los resultados de la simulación en cámara climática para el mismo mes de octubre (PC-O-V).

Tabla 2: Resumen de probetas estudiadas

Número probeta	Código probeta	Mes simulado	Condición de exposición	Método de homogenización
1	PC-F-V	Febrero	Cámara Climática	Volteado
2	PC-F-E	Febrero	Cámara Climática	Escarificado
3	PC-M-E	Marzo	Cámara Climática	Escarificado
4	PC-O-E	Octubre	Cámara Climática	Escarificado
5	PT-O-E	Octubre	Terreno	Escarificado

Codificación de probetas: PX-Y-Z, donde X corresponde al tipo de condición de exposición (C = Cámara climática y T = Terreno), Y corresponde al mes (Febrero = F, Marzo = M, y Octubre = O) y Z corresponde al método de homogeneización (V = Volteado y E = Escarificado)

Resultados y análisis Influencia del método de homogeneización

La influencia del proceso de homogeneización se puede estudiar al comparar las probetas PF-V y PF-E, cuya evolución de la humedad se presenta en la Figura 5. Durante el primer día simulado, correspondiente al procedimiento de homogeneización de volteo, se observa un descenso de humedad de 1.6% al terminar el día de radiación. Durante el segundo día de simulación, en donde se implementó el método de escarificación, se observa un descenso de humedad de 3.6% al terminar el día de radiación. Además, se observa una inconsistencia en los resultados obtenidos producto del volteo, la cual se atribuye a la mala homogeneización de la humedad en el estrato.

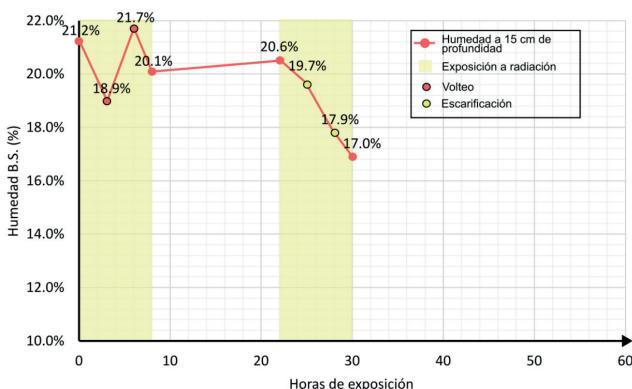


Figura 5: Evolución del contenido de humedad B.S. con escarificación v/s volteo en horas de exposición a radiación

Se observa un efecto significativo en el sistema de homogeneización de la humedad en el suelo, obteniendo mejores resultados cuando existe una mezcla completa del suelo superficial con todo el suelo (escarificación), y no solo un intercambio de capas para que la más húmeda se encuentre en la superficie (volteo). Se realiza para los siguientes ensayos solo método de escarificación.

Influencia del mes del año

La influencia estacional se puede identificar al estudiar las probetas PF-E, PM-E, y PO, E, cuyos resultados se presentan en la Figura 6. Como se observa, para los meses de febrero, octubre y marzo, la humedad inicial de las probetas se encuentra en el rango de 20.6% y 20.9%.

Como es de esperar, para todos los meses se advierte que la humedad de la tierra presenta una tendencia a disminuir mientras aumenta su tiempo de exposición al clima simulado. Además, se puede observar que durante el día la humedad de la tierra disminuye en mayor medida que en la noche, debido a mayores temperaturas y la presencia de radiación solar que promueven la evaporación y sublimación del agua superficial. Por otro lado, la humedad de las probetas aumenta durante la noche, lo que se explica por un aumento de la humedad relativa del aire. En función de esto, una recomendación es detener la exposición del suelo a las condiciones ambientales al finalizar el día o extinción de la radiación solar, para evitar la humectación de la tierra. Esta protección se puede realizar empleando cubiertas plásticas o geotextiles por sobre el suelo.

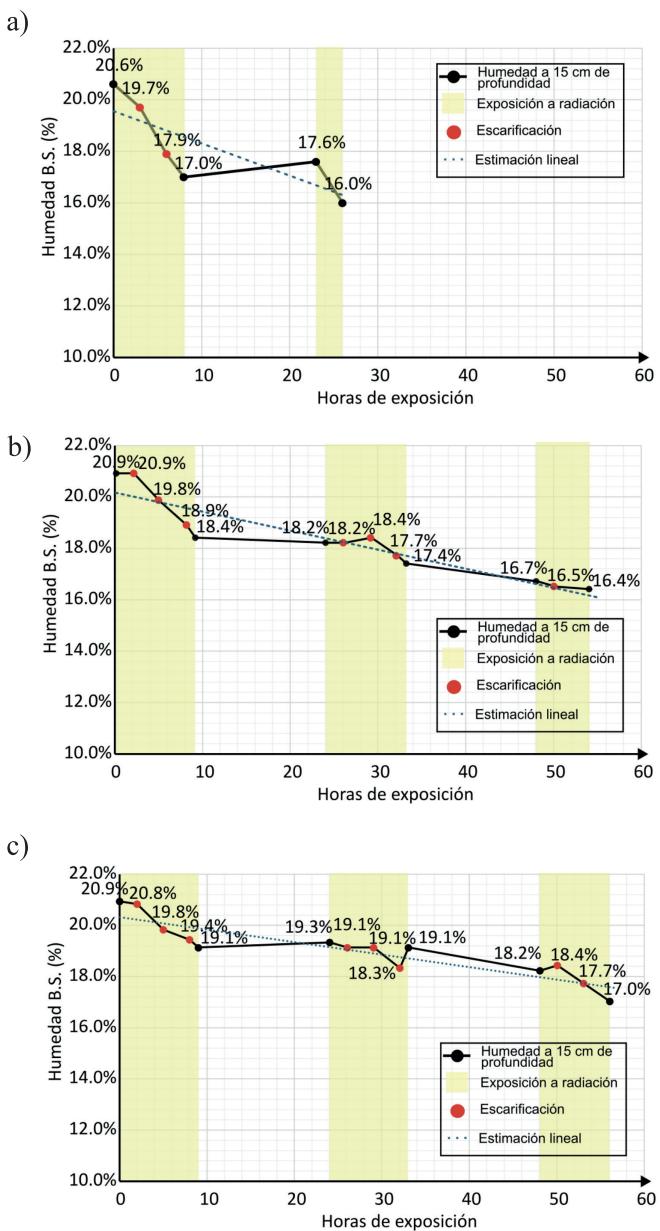


Figura 6: Evolución de contenido de humedad B.S. de las probetas: a) PF-E (febrero), b) PM-E (marzo), y c) PO-E (octubre)

Para el clima simulado del mes de febrero se observa una reducción de humedad promedio de 2.6% en promedio por día de exposición, requiriendo incluso de solo un día de exposición para alcanzar la humedad objetivo H_{obj} (17%). Mientras que para el clima simulado del mes de octubre se presenta una atenuada reducción en la humedad de un 1.8% en promedio por día de exposición, requiriendo de poco más de dos días de exposición (50 horas) para alcanzar H_{obj} . En tanto, para el clima simulado del mes de marzo, se observa una todavía más atenuada reducción en la humedad.

dad de un 1.2% en promedio por día de exposición, por lo que se requirieron de 3 días completos de exposición para alcanzar H_{obj} . Este es un resultado esperable, pues marzo es el mes más alejado del solsticio de verano (aproximadamente el 21 de diciembre) de los tres meses en estudio, con una energía de radiación solar en las 6 horas centrales un 12.7% menor respecto a la observada en el mes de febrero, y un 9.1% menor respecto al mes de octubre.

Además, se realizaron estimaciones lineales, ajustadas mediante el método de mínimos cuadrados, del descenso de humedad de las probetas en función únicamente del tiempo de exposición a la radiación solar, asumiendo protección frente a la humectación de la tierra durante la noche. Los resultados de este ajuste se comparan en la Figura 7 para los meses de febrero, marzo y octubre. Al analizar los resultados, se observa que para llegar a una humedad objetivo de 17% son estimadas 8 horas de exposición en el mes de febrero, 19 horas en el mes de octubre y cerca de 28 horas para el mes de marzo.

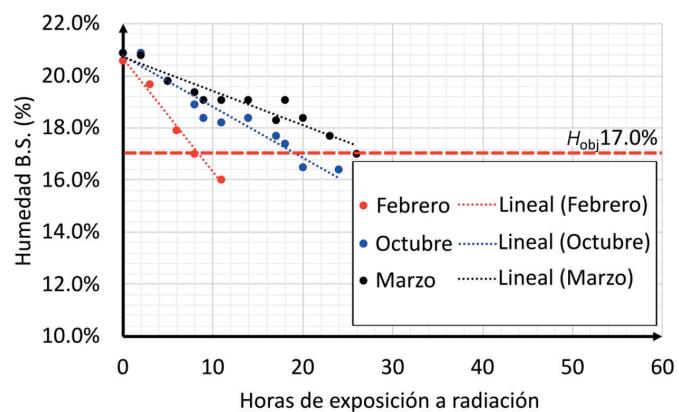


Figura 7: Estimación de descenso de contenido de humedad respecto a horas de exposición a radiación para meses de febrero, marzo y octubre, considerando protección de humedad en la noche

Comparación con experiencia en terreno

La Figura 8 muestra una comparación de los resultados obtenidos mediante la simulación en cámara climática y en la cancha dispuesta en terreno. Se evidencia una predicción acertada del descenso del contenido de humedad, donde, luego de 24 horas de exposición a la intemperie, la probeta simulada en cámara climática presenta una reducción del 4.5% en el contenido de humedad, mientras que la cancha en terreno exhibe una disminución del 4%. Esta

comparación refleja una simulación efectiva para la predicción del descenso en el contenido de humedad para suelos expuestos a la intemperie, con una diferencia de 0.5%.

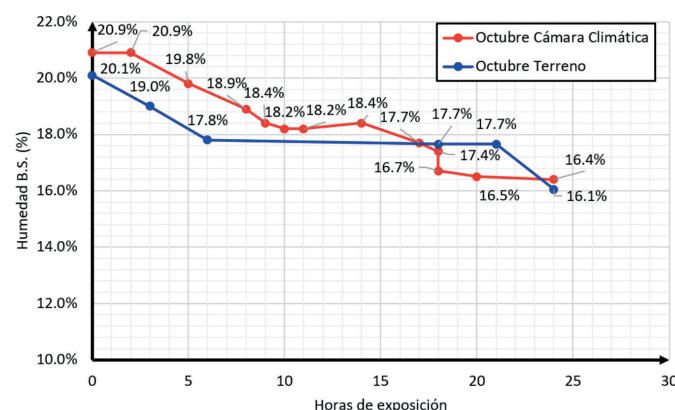


Figura 8: Comparación de descenso de contenido de humedad respecto a horas de exposición a la intemperie para cámara climática y en terreno para el mes de octubre

Conclusiones

Este estudio propone un método sostenible para reutilizar suelos excavados en estabilización o relleno, basado en la planificación del secado solar. Las simulaciones experimentales realizadas para diferentes épocas del año y la comparación de dos métodos de homogeneización mecánica llevaron a las siguientes conclusiones:

- La simulación en cámara climática representa efectivamente el descenso del contenido de humedad, con una diferencia de solo 0.5% respecto a pruebas en terreno.
- Las condiciones higrotérmicas, viento y radiación solar en febrero, marzo y octubre, junto con escarificación continua, permiten reducir la humedad a niveles adecuados para su uso en caminos estabilizados.
- Se recomienda interrumpir la exposición del suelo al finalizar el día para aumentar la tasa de desecación, ya que la humedad tiende a aumentar levemente por la noche.
- Los meses entre octubre y marzo son óptimos para el secado ambiental, aunque la velocidad de secado disminuye post-solsticio de verano.

- Se sugiere seguir investigando esta metodología por su gran potencial en la planificación ambiental.
- Factores como tipo de suelo, humedad inicial y variabilidad climática afectan el comportamiento higrotérmico, haciendo que la simulación mediante cámara climática sea útil para optimizar costos de construcción y evaluar inversiones en relación a la humedad del suelo.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del proyecto EASER (Evolution Assessment of Seismic Risk) bajo el número de subvención ACT240044 de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID). Sebastián Calderón también agradece el apoyo del proyecto FONDECYT INICIACIÓN N.^o 11230388 de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID). Gonzalo Lema agradece el apoyo financiero de ANID–Subdirección de Capital Humano/Doctorado Nacional/2025-21251893.

Referencias

Cordero, R.R., Feron, S., Damiani, A., Sepúlveda, E., Jorquera, J., Redondas, A., Seckmeyer, G., Carrasco, J., Rowe, P. and Ouyang, Z. (2023). Surface solar extremes in the most irradiated region on earth, Altiplano. *Bulletin of the American Meteorological Society* **104**(6), 1206-1221. <https://doi.org/10.1175/bams-d-22-0215.1>

Gan, V.J. and Cheng, J.C. (2015). Formulation and analysis of dynamic supply chain of backfill in construction waste management using agent-based modeling. *Advanced Engineering Informatics* **29**(4), 878-888. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.01.004>

Hale, S.E., Roque, A.J., Okkenhaug, G., Sørmo, E., Lenoir, T., Carlsson, C., Kupryianchyk, D., Flyhammar, P. and Žlender, B. (2021). The reuse of excavated soils from construction and demolition projects: limitations and possibilities. *Sustainability* **13**(11), 6083. <https://doi.org/10.3390/su13116083>

Honsberg, C.H. and Bowden, S. B. (2019). Absorption coefficient. Photovoltaics education website <https://www.pveducation.org>

Huang, S.L., Yeh, C.T. and Chang, L.F. (2010). The transition to an urbanizing world and the demand for natural resources. *Current Opinion in Environmental Sustainability* **2**(3), 136-143. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2010.06.004>

López-Lara, T., Hernández-Zaragoza, J.B., Horta-Rangel, J., Rojas-González, E., López-Ayala, S. and Castaño, V.M. (2017). Expansion reduction of clayey soils through surcharge application and lime treatment. *Case Studies in Construction Materials* **7**, 102-109. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.06.003>

Liu, S.Y., Cai, G.H., Du, G.Y., Wang, L., Li, J.S. and Qian, X.C. (2020). Field investigation of shallow soft-soil highway subgrade treated by mass carbonation technology. *Canadian Geotechnical Journal* **58**(1), 97-113. <https://doi.org/10.1139/cgj-2020-0008>

McQuillan, M., Smernik, R.J. and Ryba, R. (2024). Sunlight can have a stronger influence than air temperature on soil solarisation: observational evidence from Australia. *Soil Research* **62**, SR23168. <https://doi.org/10.1071/sr23168>

Wang, H., Zhang, N., Duan, H., and Dong, L. (2024). Pathways to sound management of excavated soil and rock: A case study in Shenzhen. *Journal of Cleaner Production* **458**, 142383. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142383>

Zhan, L., Wang, J., Liang, T., Chen, Y., Wang, S., Lou, H. and Zhang, H. (2023). Aggregation and dehydration of excavated soft clay and use for subgrade engineering—Part 1: A laboratory study. *Transportation Geotechnics* **38**, 100914. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100914>