



ISSN: 2616-9541

Revista de Investigación

APORTE SANTIAGUINO

Ingeniería e Innovación

Vol. 17, Núm. 2 (2024): julio-diciembre



Dialnet



DOAJ



REDIB
Red Iberoamericana
de Investigación y Ciencia



Crossref



BASE MIAIR



latindex



AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

RECTOR

Dr. Carlos Reyes Pareja

VICERRECTOR ACADÉMICO

Dr. Marco Sila Lindo

VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN

Dra. Consuelo Valencia Vera

UNASAM
LICENCIADA

"Una Nueva Universidad para el Desarrollo"

¡La primera en la región Áncash!

ISSN-L: 2616-9541
ISSN: 2070-836X

UNIVERSIDAD NACIONAL
SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO

“Una Nueva Universidad para el Desarrollo”

Vicerrectorado de Investigación

Dirección del Instituto de Investigación

Revista de Investigación

APORTE
SANTIAGUINO

Ingeniería e Innovación

Volumen 17, N° 2, julio - diciembre 2024



Huaraz, Perú

Revista de Investigación
APORTE SANTIAGUINO
Ingeniería e Innovación
Volumen 17, N° 2, julio - diciembre 2024





Cuerpo Editorial

DIRECCIÓN

Dra. Karina Soledad Vilca Mallqui

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú
kvilcam@unasam.edu.pe

EDICIÓN

Dra. Karina Soledad Vilca Mallqui

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú
kvilcam@unasam.edu.pe

COMITÉ EDITORIAL

Dr. Elio Alejandro Milla Vergara

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú

Dr. Edwin Julio Palomino Cadenas

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú

Dr. Julián Pérez Falcón

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú

Dr. Edwin Johny Asnate Salazar

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú

Mag. Katy Medina Marcos

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú

Dr. Hugo Chirinos Collantes

Universidad Nacional de Ingeniería, Perú

Dr. Flavio Gutiérrez Segura

Universidad Nacional de Piura, Perú

Dr. Freddy Mejía Coico

Universidad Nacional de Trujillo, Perú

CONSEJO CONSULTIVO

PhD. Khngdet Phasinam

Pibulsonskram Rajabhat University, Thailandia

PhD. Raul Narciso Carvahlo Guedes

Universidade Federal de Vicosa, Brasil

Dr. Harold Blas Achic

Universidad Federal de Mato Grosso, Brasil

PhD. Ángel Cobo Ortega

Universidad de Cantabria, España

Dr. Raymundo Erazo Erazo

Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú

Dr. Jesús Edilberto Espinola Gonzales

Universidad Carlos III de Madrid, España

PhD. Eusebio Mercedes Ingol Blanco

Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú

Dr. Nicolás Kemper Valverde

Universidad Nacional Autónoma de México, México

PhD. Gretty Katherina Villena Chávez

Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú

Dra. Carmen Eusebia Palacios Jara

Universidade de São Paulo - Instituto de Biociências, Brasil

GESTIÓN DE LA REVISTA ELECTRÓNICA

William Eduardo Varillas

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo

La revista de investigación *Aporte Santiaguino* es una publicación científica de periodicidad semestral. Tiene como objetivo difundir los resultados de los trabajos de investigación desarrollados en los ámbitos regional, nacional e internacional, como una contribución a la solución de la problemática natural, social y cultural.

La revista publica artículos científicos originales e inéditos en las Ingenierías. Los trabajos recepcionados son evaluados por árbitros externos según criterios de calidad.

La revista de investigación *Aporte Santiaguino* está indizada en el Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal (Latindex) y en el Directorio de Revistas de Acceso Abierto (DOAJ).

Hecho el depósito legal en la
Biblioteca Nacional del Perú N° 2008-13057
ISSN-L: 2616-9541
ISSN: 2070-836X
Tiraje: 250 ejemplares

Comunicaciones:

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo.
Vicerrectorado de Investigación.
Dirección del Instituto de Investigación.
Av. Centenario N° 200, Huaraz, Perú.
Teléfono: (51) 043-640020 Anexo: 3613.
Apartado Postal: 70.
Correo electrónico: revistaaportesantiaguino@unasam.edu.pe.

El contenido de cada artículo es de responsabilidad exclusiva de los autores y no expresa, necesariamente, la opinión de la revista.

Licencia:

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo.
Vicerrectorado de Investigación



licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional.

La revista está disponible a texto completo en la página web: <http://revistas.unasam.edu.pe>.

Artículos Originales

El contenido de humedad y el valor de soporte en suelos cohesivos en el distrito de Independencia

Alfredo Huaman Livia, Elio Milla Vergara y Daylu Pagola Ávila..... Pág. 173-182

Simulación del balance hídrico mediante la geomática en la cuenca del río Cañete

Miriam Vilca Arana..... Pág. 183-190

Comportamiento de muros de adobe con aislamiento sísmico empleando shicras bajo carga lateral monotónica

Gerardo Revelo Sánchez, Fidel Aparicio Roque, Fernando Arias Enriquez, Atilio López Carranza y Flor Jara Remigio Pág. 191-200

Ecuaciones empíricas para la estimación de las intensidades de lluvias máximas anuales de diferentes duraciones y períodos de retorno, Huaraz – Perú

Toribio Reyes Rodríguez..... Pág. 201-210

Artículos de Revisión

Revisión de literatura para el análisis del desempeño del modelo SWAT en la disponibilidad hídrica futura

Carlos Martínez Zelaya y Fidel Aparicio Roque..... Pág. 211-224

Biodiseño de Materiales de Construcción Sostenibles

Diego Jesus Aranda..... Pág. 225-246

La certificación ambiental en los proyectos de exploración minera

Michael Ramírez Broncano y Miguel Ramírez Guzmán..... Pág. 247-254

El contenido de humedad y el valor de soporte en suelos cohesivos en el distrito de Independencia

Resumen

Alfredo Huaman Livia

Bachiller en Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM) - Huaraz - Áncash, conocimiento en el área de suelo, concreto y pavimento, capacitado en EMV. Laboratorios y Construcción EIRL, en la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y otros.

ahuamanl@unasam.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0001-6396-848X>

Elio Milla Vergara

Ingeniero Civil de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Maestro en Ingeniería Geotécnica de la Universidad Nacional de Ingeniería Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo sostenible de la Universidad Nacional Federico Villarreal. Docente principal de la Facultad de Ingeniería Civil - UNASAM

emillav@unasam.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0001-9931-0970>

Daylu Pagola Ávila

Bachiller en Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM) – Huaraz - Áncash

dpagolaa@unasam.edu.pe

<https://orcid.org/0009-0007-8976-9236>

El presente estudio tuvo como objetivo determinar la incidencia y relación del contenido de humedad (CH) en el valor de soporte (CBR) y la densidad del suelo cohesivo a nivel de subrasante en el barrio de Shancayán, Huaraz, Áncash, para condiciones de 12, 26 y 55 golpes por capa. A partir de estos datos, se elaboraron mapas de isolíneas de CBR utilizando las herramientas Excel y OriginPro 2019b. Se adoptó un enfoque cuantitativo, con un método deductivo, diseño experimental y corte transversal. Los instrumentos empleados fueron fichas de recolección de datos y formatos de laboratorio, mientras que las fuentes consultadas incluyeron normativas del MTC, artículos científicos, tesis y libros especializados. Los resultados obtenidos para penetraciones de 0.1” y 0.2” muestran que los valores de CBR y densidad aumentan inicialmente con el contenido de humedad, para luego disminuir a medida que el CH supera ciertos niveles. En particular, se observó que los valores de CH óptimos para obtener el máximo CBR son 13.5%, 12.5% y 10.45% para condiciones de 12, 26 y 55 golpes por capa, respectivamente. Se concluye que para valores de 13.5%, 12.5% y 10.45% para 12, 26 y 55 golpes por capa respectivamente, la relación del CH con el valor de CBR, por encima del contenido de humedad óptima (CHO), es inversamente proporcional. Sucede lo contrario para la relación del CH con el valor de densidad por debajo del CHO.

Palabras claves: Cbr, Contenido de Humedad, Energía de Compactación

Cómo citar este artículo: Huaman Livia, A., Milla Vergara, E. ., & Pagola Ávila, D. . (2024). El contenido de humedad y el valor de soporte en suelos cohesivos en el distrito de Independencia. *Aporte Santiaguino*, 17(2), Pág. 171–180. <https://doi.org/10.32911/as.2024.v17.n2.1171>

Recibido: 2024-08-17 | **Aceptado:** 2024-11-12



Moisture content and support value in cohesive soils in the Independence district

In this research, the objective was to determine the incidence and relationship of moisture content (CH) in the Support Value (CBR) and density for 12, 26 and 55 strokes per layer for the cohesive soil at the subgrade level of the Shancayan neighborhood. -Huaraz-Ancash, with which CBR isoline maps were created using Excel and OriginPro 2019b. The method is deductive, quantitative approach, experimental and transversal design. The instruments used are data collection sheets, laboratory formats. The sources used are the MTC, scientific article, thesis, books. The results for 0.1" and 0.2" penetration show CBR and Density values that increase and then decrease for different CH. Finally, it is concluded that for values of 13.5%, 12.5% and 10.45% for 12, 26 and 55 strokes per layer respectively, the relationship of the CH with the CBR value above the optimal moisture content (CHO), have an inverse relationship. proportional. The opposite happens for the relationship between CH and the density value below CHO.

Keywords: Cbr, Moisture Content, Compaction Energy

Introducción

En los proyectos de construcción de carreteras en el Perú, es común encontrar suelos cohesivos, los cuales requieren una serie de ensayos técnicos, incluyendo la determinación del valor de soporte (CBR). Este parámetro es fundamental tanto para el diseño como para la ejecución del pavimento. Según la norma MTC E132, para los suelos granulares el ensayo de CBR se realiza considerando únicamente el óptimo contenido de humedad (CHO). Sin embargo, en el caso de los suelos cohesivos, la norma establece que se deben realizar ensayos con diferentes porcentajes de humedad para evaluar adecuadamente su comportamiento. Para llevar a cabo el ensayo de CBR en suelos cohesivos, se requiere utilizar tres moldes de 6 pulgadas de diámetro, llenos con la muestra en 5 capas. Cada molde se

compacta con diferentes números de golpes por capa: 55 golpes para el molde 1, 26 golpes para el molde 2, y 12 golpes para el molde 3. No obstante, en muchos laboratorios, debido a las exigencias de las empresas y los tiempos ajustados de ejecución, se realizan estos ensayos de manera apresurada, omitiendo controles esenciales establecidos en la norma MTC E132. Entre los parámetros que deben ser medidos cuidadosamente se encuentran el tiempo de saturación, los contenidos de humedad, las energías de compactación, entre otros. El incumplimiento de estos controles puede comprometer la calidad y confiabilidad de los resultados obtenidos, afectando potencialmente el diseño y desempeño de las estructuras viales.

Según Pariona Quintana (2014), la humedad y la energía de compactación interactúan utilizando una prueba factorial para determinar la eficiencia de resistencia del material utilizado para subbase. Cuando el material es seco, la resistencia es mayor. Sin embargo, los mapas de resistencia optimizados pueden tener áreas donde el material se encuentra más seco y no requiere mucha compactación para lograr una alta resistencia.

Feo y Alvarado (2012) realizaron pruebas factoriales sobre material de limo arcilloso obtenido de una colección de materiales seleccionados para construir el núcleo de una Presa con los siguientes parámetros: 70% pasa T200, IP= 24, CHO= 28.6 % y DMS=1458.5 kg/m³. Las muestras utilizadas fueron homogenizadas, cuarteadas y secadas al aire. Se prepararon 15 muestras compactadas usando un martillo estándar en un molde Proctor de 6 pulgadas a diferentes variaciones de humedad y grados variables de compactación.

Hoy en día vemos que se realizan ensayos para materiales de sub base, base, afirmado y material de relleno, dejando en segundo plano a la sub rasante. Los diferentes tipos de suelos a nivel de sub rasante, que presentan propiedades cohesivas variadas, son materia de investigación. Se realiza todos los ensayos posibles, manteniendo un estricto cumplimiento de las normas. La relación de humedad, densidad y resistencia es muy

peculiar para diferentes tipos de suelos, los cuales se obtienen a través de mapas de resistencia que relacionan con calidad garantizada el laboratorio con el campo.

El objetivo del estudio es determinar la relación del CH en el valor de CBR y densidad de suelo cohesivo a nivel de sub rasante, así como comparar la relación entre el CH y el valor de CBR por encima del contenido de humedad óptima para 12, 26 y 55 golpes por capa y establecer la relación entre el CH y la densidad por debajo del contenido de humedad óptima para 12, 26 y 55 golpes por capa.

Figura 1

Muestra para compactación y CBR



La población estuvo compuesta por los suelos cohesivos a nivel de sub rasante en la ciudad de Huaraz. Las muestras de suelo cohesivo se obtuvieron del barrio de Shancayán, distrito de Independencia, provincia de Huaraz. Debido a la complejidad de los ensayos con diferentes contenidos de humedad en el suelo cohesivo a nivel de sub rasante, el espécimen elegido fue del tipo no probabilístico, realizando un muestreo por conveniencia

Relación entre contenido de humedad, densidad y CBRs de los valores obtenidos de la ecuación polinómica de grado 3 a 0.1” y 0.2” de penetración

El mapa de resistencia se obtuvo a través de la matriz de interpolación en el programa OriginPro 2019b, que muestra las curvas de nivel de los valores de CBR para CH y densidades diversas. Se ordenó de menor número de golpes/capa a mayor número de golpes/capa. La Tabla 1 muestra los 8 valores de CH (%), densidad (g/cm^3) y CBR (%) a 0,1” y 0,2” de penetración para 12, 26 y 55 golpes/capa, ordenados de manera ascendente.

Materiales y métodos

Por la naturaleza de los datos, la investigación tiene un enfoque cuantitativo y un diseño transversal. Es experimental porque se manipuló las variables independientes que afectan a las dependientes. El método es deductivo porque se buscó realizar el análisis de la investigación partiendo de teorías universales para un contexto y lugar determinado. La investigación es descriptiva porque se describen los valores de contenidos de humedad y CBR obtenidos. Y es explicativa porque se detallan los efectos de contenido de humedad en el valor de CBR.

Tabla 1
Resultados de laboratorio

	CH (%)	Densidad (g/cm ³)	CBR (0.1")	CBR (0.2")
12 golpes/capa	8,69	1,66	3,72	2,96
	9,10	1,71	5,27	4,39
	10,78	1,74	5,05	4,02
	10,96	1,80	6,01	4,81
	12,64	1,89	12,58	12,40
	13,03	1,88	10,60	10,63
	14,70	1,85	5,50	5,41
	15,23	1,82	3,89	3,56
26 golpes/Capa	8,52	1,84	5,08	4,49
	9,05	1,90	8,19	7,06
	10,24	1,92	12,59	10,93
	11,09	1,96	16,58	15,10
	12,86	1,98	14,53	14,38
	13,05	1,97	12,43	12,44
	14,92	1,91	5,75	5,72
	15,07	1,84	3,88	3,61
55 golpes/capa	8,65	1,98	8,03	7,19
	9,07	2,02	14,02	13,68
	10,41	2,07	23,00	22,80
	11,24	2,04	28,69	28,54
	12,32	1,99	16,60	16,41
	12,86	1,97	14,92	13,74
	14,61	1,93	6,72	6,49
	15,18	1,84	4,39	3,95

El Mapa de Resistencias nos permite determinar el valor de CBR a 0,1" y 0.2" de penetración para suelos cohesivos. Es muy útil para los controles de campo y conocer el CH y la densidad seca, como se muestra en las figuras 2 y 3, respectivamente.

Figura 2
Cálculo de Isolénea de CBR

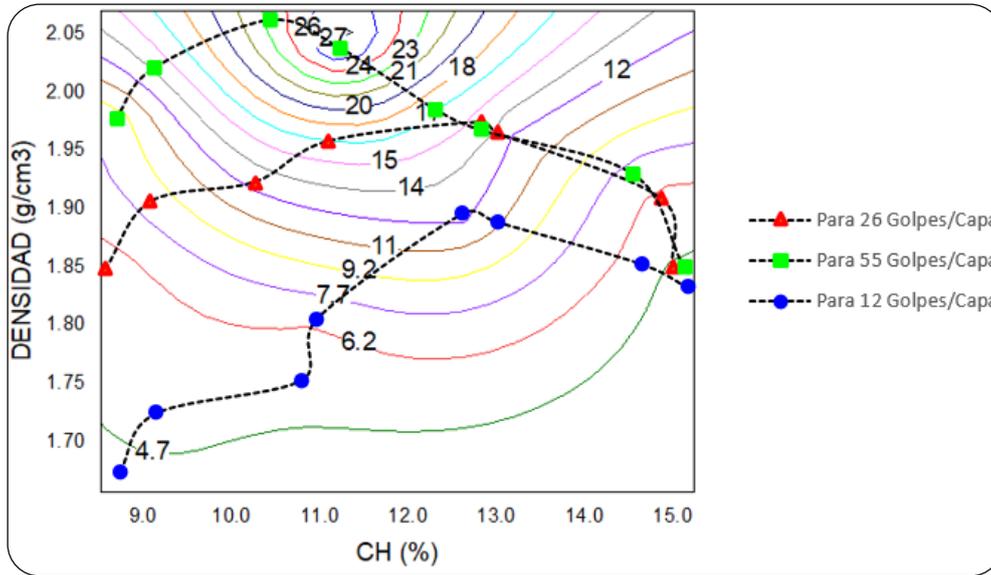
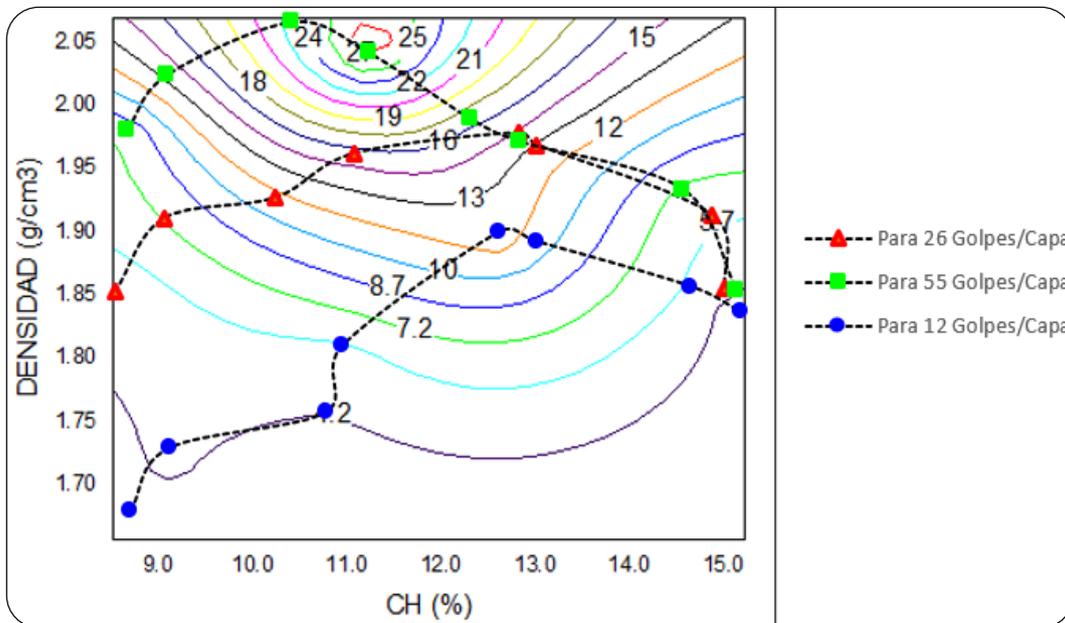


Figura 3
Cálculo de Isolénea de CBR



[El contenido de humedad y el valor de soporte en suelos cohesivos en el distrito de Independencia]

Relación entre contenidos de humedad, densidad y CBRs de los valores obtenidos sin corrección a 0.1” y 0.2” de penetración

El mapa de resistencia se obtuvo a través de la matriz de interpolación en el programa OriginPro 2019b, que mostró las curvas de nivel de los valores de CBR para CH y densidades diversas. Se ordenó de menor número de golpes/capa a mayor número de golpes/capa. La Tabla 2 muestra los 8 valores de CH (%), densidad (g/cm³) y CBR (%) a 0,1” y 0,2” de penetración para 12, 26 y 55 golpes/capa ordenados de manera ascendente.

Tabla 2
Resultados de laboratorio

	CH (%)	Densidad (g/cm ³)	CBR (0.1”)	CBR (0.2”)
12 golpes/capa	8,69	1,66	3,61	2,58
	9,10	1,71	5,17	3,79
	10,78	1,74	4,91	3,45
	10,96	1,80	5,69	4,14
	12,64	1,89	12,46	12,48
	13,03	1,88	11,94	9,87
	14,70	1,85	5,69	4,84
	15,23	1,82	3,87	3,27
26 golpes/capa	8,52	1,84	4,91	4,14
	9,05	1,90	8,30	6,23
	10,24	1,92	12,72	9,70
	11,09	1,96	16,11	13,86
	12,86	1,98	15,07	13,00
	13,05	1,97	14,02	11,95
	14,92	1,91	5,69	5,53
	15,07	1,84	3,87	3,27
55 golpes/capa	8,65	1,98	7,77	6,75
	9,07	2,02	14,29	13,17
	10,41	2,07	29,39	20,64
	11,24	2,04	34,34	26,19
	12,32	1,99	16,63	15,77
	12,86	1,97	15,07	12,48
	14,61	1,93	6,73	6,23
	15,18	1,84	4,39	3,62

El Mapa de Resistencias nos permite determinar el valor de CBR a 0,1” y 0,2” de penetración para suelos cohesivos. Es muy útil para los controles de campo y conocer el CH y la densidad seca (figuras 4 y 5).

Figura 4

Cálculo de Isolénea de CBR

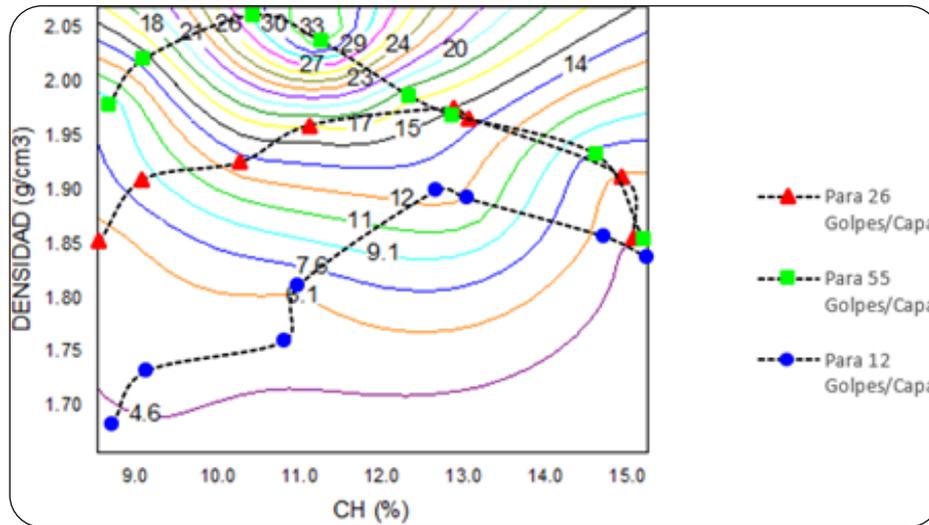
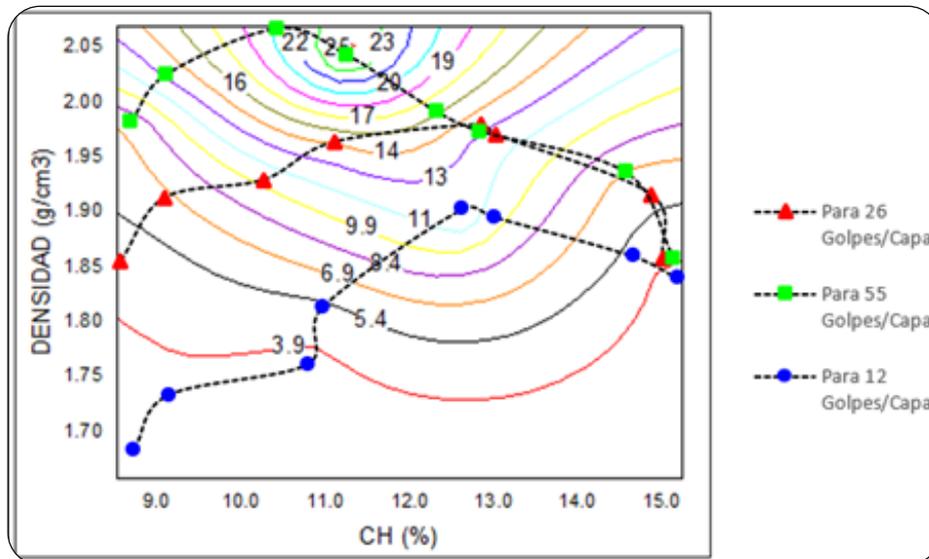


Figura 5

Cálculo de Isolénea de CBR



Discusión

En los ensayos de CBR, una vez finalizado el proceso de compactación, las muestras deben ser sumergidas en una poza durante un periodo de 4 días. Este procedimiento permite que el agua fluya desde la base hacia el interior de la muestra, asegurando una saturación adecuada. Este paso es crucial para garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos (Figura 6).

Figura 6

Ensayo de CBR



Valores obtenidos de la ecuación polinómica de grado 3 a 0.1” y 0.2” de penetración

En la Figura 2, se observa el Mapa de Resistencia, que tiene valores de CBR (%) entre 4,7 % a 27 %, para valores de CH (%) entre 9 % a 15 % y valores de densidad (g/cm^3) entre 1,70 g/cm^3 a 2,05 g/cm^3 . En la Figura 3, se muestra el Mapa de Resistencia, que tiene valores de CBR (%) entre 4,2 % a 27 %, para valores de CH (%) entre 9 % a 15 % y valores de densidad (g/cm^3) entre 1,70 g/cm^3 a 2,05 g/cm^3 .

De los valores obtenidos sin corrección a 0.1” y 0.2” de penetración

En la Figura 4, se puede observar el Mapa de Resistencia, que tiene valores de CBR (%) entre 4,6 % a 33 %, para valores de CH (%) entre 9 % a 15 % y valores de densidad (g/cm^3) entre 1,70 g/cm^3 a 2,05 g/cm^3 . En la Figura 5, se observa el

Mapa de Resistencia, que tiene valores de CBR (%) entre 3,9 % a 25 %, para valores de CH (%) entre 9 % a 15 % y valores de densidad (g/cm^3) entre 1,70 g/cm^3 a 2,05 g/cm^3 . Estos procedimientos son similares a los efectuados por Feo y Alvarado (2012) quienes obtuvieron los resultados para valores de CBR (%) entre 40 % a 100 %, para valores de CH (%) entre 25 % a 38 % y valores de densidad (g/cm^3) entre 1,28 g/cm^3 a 1,52 g/cm^3 . El contenido de humedad tiene una relación inversa y directa con el valor de CBR y densidad, respectivamente, cuando se analiza por encima y por debajo del CH óptimo.

La relación del CH con el valor de CBR, por encima del contenido de humedad óptima para valores de 13,5% para 12 golpes por capa, 12,5 % para 26 golpes por capa y 10,45 % para 55 golpes por capa, es inversamente proporcional.

La relación del CH con el valor de densidad, por debajo del contenido de humedad óptima para valores de 13,5% para 12 golpes por capa, 12,5 para 26 golpes por capa y 10,45 % para 55 golpes por capa, es directamente proporcional.

Referencias

- Aburto Aburto, M. A., & Rodríguez López, D. (2011). *Caracterización de la resistencia de un material de banco para su uso como relleno compactado* [Tesis para optar título de ingeniero civil, Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.52.100:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/466/A1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Braja, M. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México: Thomson Editores S.A. <https://es.slideshare.net/ralvmrz/fundamentos-de-ingeniera-geotcnica-braja-m-das>
- Feo, C. L. E., & Alvarado, L. R. (Noviembre de 2012). *Uso de mapas de resistencia para el control de calidad en construcción de terraplenes de suelos cohesivos*. <https://fddocuments.mx/document/uso-de-mapas-de-resistencia-para-el-resistencia-al-corte-no-asi-en-suelos.html?page=2>
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2005). *Mecánica de suelos, Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. Mexico: Limusa S.A. https://suelos.milaulas.com/pluginfile.php/128/mod_resource/content/1/Mecanica%20de%20suelos%20-%20Juarez%20Badillo.pdf
- MTC. (2014). *Manual de Carreteras. Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. Sección Suelos y Pavimentos*. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_7%20SGGP-2014.pdf
- MTC. (2016). *Manual de Ensayos de Materiales*. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_5%20%20EM-2016.pdf
- Municipalidad Distrital de Independencia-Huaraz. (2019-2021). *Plan de Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres del distrito de Independencia, provincia Huaraz, región Ancash*. <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/7072>
- Pariona Quintana, L. (2014). *Estudio de la resistencia de la sub-base usando experimentos factoriales basado en el contenido de humedad, energía de compactación y la hidratación* [Tesis para título de ingeniero civil, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/408>
- Rico Rodríguez, A. (2014). *Volumen Alfonso Rico Rodríguez*. MEXICO: Instituto mexicano del transporte. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/Libro/lb6.pdf>
- Rodríguez, A. R., & Mejía, H. D. (1992). *Consideraciones Sobre Compactación de Suelos en Obras de Infraestructura de Transporte*. México. <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/DocumentoTecnico/dt7.pdf>

Simulación del balance hídrico mediante la geomática en la cuenca del río Cañete

Resumen

Miriam Vilca Arana

Ingeniero Químico colegiada y habilitada. Científica reconocida por la Universidad Nacional San Luis Gonzaga, reconocida en el Ranking mundial de Científicos 2024. Doctora en ciencias ambientales por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Magíster en Docencia Universitaria por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos y Docente pregrado y posgrado en universidades públicas y privadas. CHa realizado una pasantía internacional en la University of Cambridge, Reino Unido (UK) y ha Co-investigado y Co-liderado el Proyecto Environmental Impact Analysis methods and technologies: development, environment and impact mitigation in the Cañete valley, con científicos de la University of Cambridge. Actualmente es Científica y docente ordinaria en la Universidad Nacional San Luis Gonzaga. Gerente general de Consultoría e Investigación SAC.

El problema del agua impacta negativamente en los ingresos económicos de los productores. El objetivo principal del artículo es evaluar la simulación del balance hídrico mediante la simulación geomática en la cuenca del río Cañete. De manera aproximada se calculó el valor real mediante la simulación geomática con el software ArGis. El enfoque es cuantitativo, tipo aplicado y diseño no experimental. Se determinó el balance hídrico en el río Cañete mediante el método Hargreaves y método Thomthwaite. En base a la evapotranspiración se calculó la precipitación, temperatura media, temperatura mínima y máxima. Se tomó como variables las mismas y como muestra la cuenca del río Cañete. Las técnicas aplicadas de recolección de datos son documentos y registros obtenidos de la base datos del Senamhi. Se realizó una proyección de 10 años para que el agua sea sostenible en el tiempo

Palabras claves: Simulación, Balance hídrico, Geomática, Río Cañete, Agua

Cómo citar este artículo: Vilca Arana, M. (2024). Simulación del balance hídrico mediante la geomática en la cuenca del río Cañete. *Aporte Santiaguino*, 17(2), Pág. 207–218. <https://doi.org/10.32911/as.2024.v17.n2.1184>

Recibido: 2024-08-17 | **Aceptado:** 2024-11-12



Moisture content and support value in cohesive soils in the Independence district

The water problem has a negative impact on the economic income of producers. The main objective of this article is to evaluate the simulation of the water balance through geomatic simulation in the Cañete River basin. The real value was roughly calculated using geomatic simulation with ArGis software. The approach is quantitative, applied type and non-experimental design. The water balance in the Cañete River was determined using the Hargreaves method and the Thomthwaite method. Based on evapotranspiration, precipitation, mean temperature, minimum and maximum temperature were calculated. The same variables were taken as variables and the Cañete river basin as shown. The data collection techniques applied are documents and records obtained from the Senamhi database. A 10-year projection was made for water to be sustainable over time.

Keywords: Simulation, Water balance, Geomatics, Cañete river, Water

Introducción

El agua es un recurso renovable y limitado. Es el principal factor determinante en el desarrollo económico y social y, al mismo tiempo, cumple la función básica de mantener la integridad del entorno natural. Pero es solo uno de los recursos naturales vitales y, por lo tanto, resulta indispensable que los aspectos hídricos sean tratados de forma integrada y no aislada. Por ello, el enfoque fragmentado ya no resulta válido y se hace esencial una visión integral para la gestión del agua. En estos puntos se encuentra el fundamento del enfoque para la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH), aceptado ahora internacionalmente como el camino hacia un desarrollo y gestión eficientes, equitativos y sostenibles de unos

recursos hídricos cada vez más limitados y con demandas cada vez más competitivas. (González-Otoya, 2020, p. 44).

La cuenca del río Cañete está conformada hidrológicamente por ocho subcuencas: Tanta (cuenca alta), Alis, Laraos, Huantán, Aucampi, Cacara, Tupe, Huangascar y la cuenca misma del río Cañete (parte media; sectores de Carania, Yauyos, Colonia, Zuñiga, Pacarán y Lunahuaná; y parte baja, sector del río Cañete (ONERN, 2020; CEPES, 2020).

En la planificación hidrológica, el balance hídrico —elaborado considerando los recursos disponibles y las demandas— es una herramienta importante y básica puesto que permite definir si dicho sistema es excedentario o deficitario tanto para la situación actual como para cualquier situación futura. Por lo tanto, la utilidad del balance no se circunscribe a un breve tiempo determinado: debe realizarse tanto para el año actual como para el horizonte de planificación. Para todos los casos, los conceptos que necesariamente se tendrán que confrontar en el balance serán los siguientes: las demandas brutas consuntivas (Db), es decir, los consumos totales que se extraen del sistema hídrico; y los recursos disponibles, es decir, la fuente natural de agua (González-Otoya, 2020, p. 45).

En el año 2020, la UNESCO publicó el *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídrico: Agua y Cambio Climático* con el objetivo de ayudar a la comunidad del agua a enfrentar los desafíos del cambio climático e informar sobre las oportunidades que ofrece la gestión mejorada del agua en términos de adaptación y mitigación.

El informe de la UNESCO se centra en los desafíos, oportunidades y posibles respuestas al cambio climático, en términos de adaptación, mitigación y mejora de la resiliencia, que pueden abordarse mejorando

la gestión de los recursos hídricos, atenuando los riesgos relacionados con el agua y mejorando el acceso al suministro de agua y a los servicios de saneamiento para todos de manera sostenible.

Según la FAO (2012), la agricultura se enfrenta a retos complejos de aquí al 2050 para alimentar a una población que alcanzará 9 000 millones de personas. Una certeza, sin embargo, es que se necesitará más agua para producir el 60% de los alimentos adicionales que se calcula serán necesarios.

El río Cañete en la Estación Hidrológica Socsi, el día de hoy, alcanzó un caudal máximo de 243.51 m³/s (umbral hidrológico naranja) correspondiente a una anomalía de 42% respecto a su promedio histórico. Se estima que el caudal tenga una tendencia ascendente con posibilidad de sobrepasar su umbral de inundación, por lo que no se descarta algún potencial de desborde en el distrito de Lunahuana y parte de la cuenca baja de Cañete y se recomienda a la población precaución al realizar actividades cerca del río. (Boletín Informativo Hidrológico Indeci N° 105 Del 07-03-19).

Marín (1985), en su estudio “El uso del agua en Colombia”, afirma que Colombia es uno de los países más ricos del mundo en recursos hídricos. Su precipitación media es el doble de la de los países suramericanos. Posee más de 720 mil cuencas hidrográficas con un área menor de 20 kilómetros cuadrados. Posee más de mil ríos caudalosos, es decir, por todos sus costados escurre agua hacia los océanos y sin embargo el precioso líquido falta por todas partes. En el presente trabajo se analiza la importancia de la hidrología sobre las cuencas hidrográficas, en especial la utilización de técnicas y procedimientos para determinar la precipitación pluvial media de un área, las curvas de frecuencias, la medición de caudales, el análisis de escurrimiento superficial y todas las demás variables que se analizan en una cuenca.

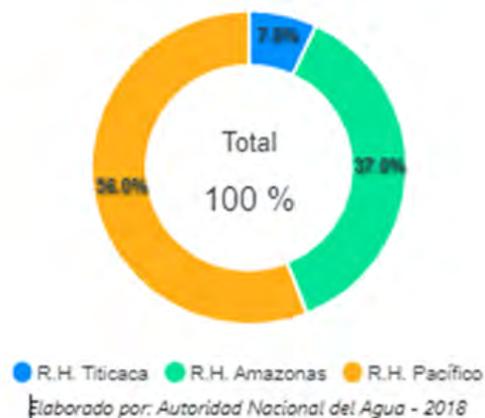
Las estaciones hidrométricas miden la cantidad de agua que fluye en los cuerpos de agua natural y artificial. Permiten determinar el caudal, a través del registro de nivel de agua que mediante la ecuación de transformación nivel-caudal, se determina en cada instante el caudal de paso.

El objetivo principal de la estación hidrométrica es obtener información sobre la cantidad de recursos hídricos superficiales, su distribución geográfica, así como su variabilidad a lo largo del tiempo.

El conocimiento de la cantidad de agua es de vital importancia para el planeamiento, control, diseño, operación y gestión de los recursos hídricos en nuestro país. A nivel nacional se cuenta con 295 estaciones de las cuales el 75% son administradas por el Servicio Nacional de Meteorológica e Hidrología, la diferencia corresponde a Proyectos Especiales, Juntas de Usuarios, privados y la Autoridad Nacional del Agua.

A continuación, se muestra la distribución y cantidad de estaciones hidrométricas en porcentaje (%) por regiones hidrográficas. Se observa que el 56% de estaciones hidrométricas se encuentra en la Región Hidrográfica Pacífico, 37% en Amazonas y solo un 7% en el Titicaca (Ver figura 01)

Figura 1
Estaciones hidrométricas por región hidrográfica



[Simulación del balance hídrico mediante la geomática en la cuenca del río Cañete]

El presente estudio corresponde a un enfoque cuantitativo, no experimental, nivel de investigación descriptivo correlacional. Las unidades de análisis fueron los modelos digitales (rastres). La técnica utilizada para el recojo de información fue la revisión documental: documentos y registros en la base datos de SENAMHI y de la ANA.

Para analizar e interpretar la información se tuvo en cuenta los siguientes métodos:

Método de Isoyetas (precipitación, temperatura)

Teniendo como base la información de las precipitaciones mensuales y anuales de las estaciones cercanas al proyecto, brindada por el Sistema Nacional de Gestión de Recursos Hídricos (ANA) y con la ayuda de los ArcMap, se elaboró los mapas para caracterizar la cuenca.

Figura 2
Mapa de temperatura mínima (1981-2010) multianual de la cuenca del río Cañete

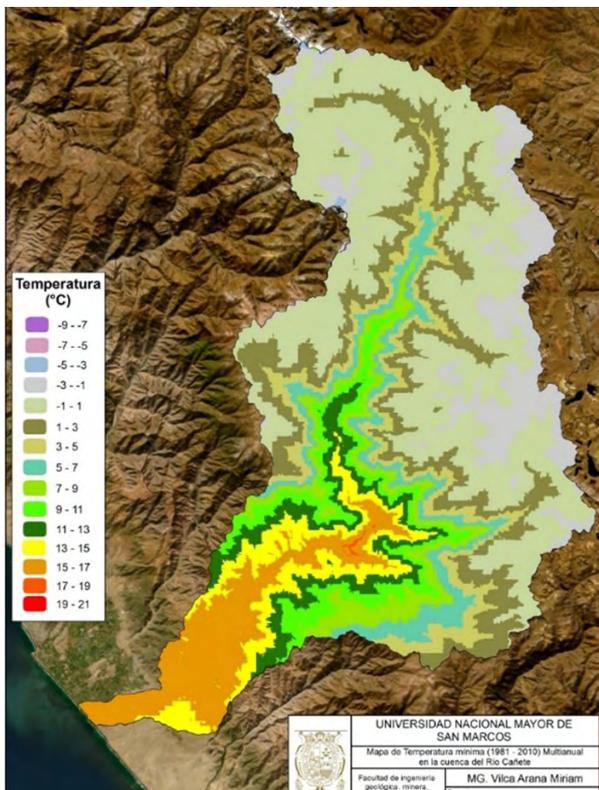


Figura 3
Mapa de temperatura máxima (1981-2010) multianual de la cuenca del río Cañete

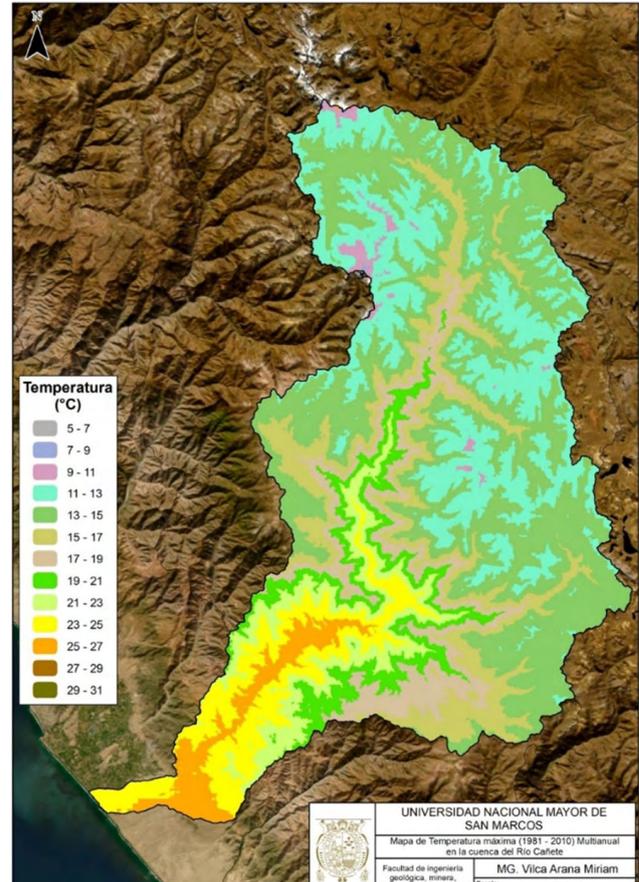


Figura 4

Mapa de temperatura media (1981-2010) multianual de la cuenca del río Cañete

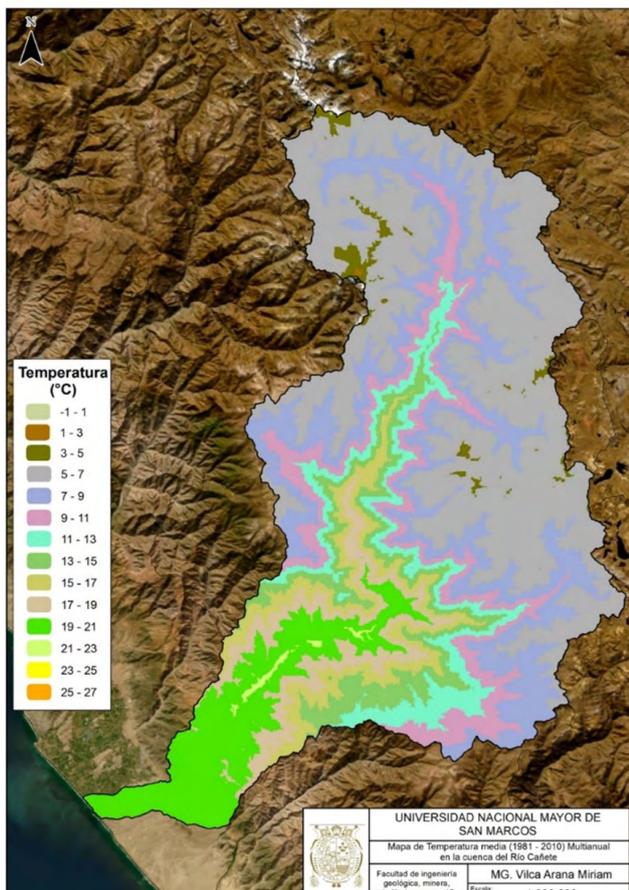
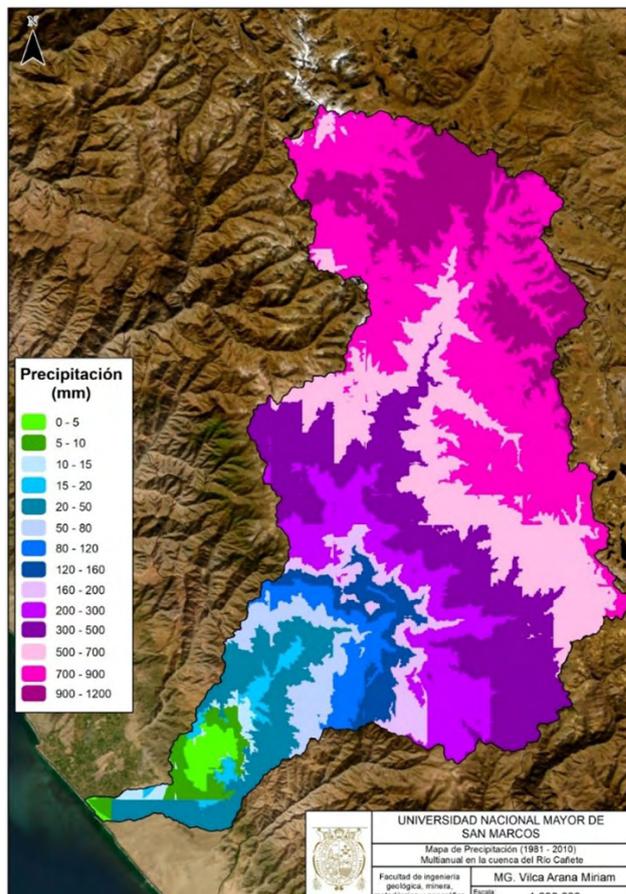


Figura 5

Mapa de precipitación (1981-2010) multianual de la cuenca del río Cañete



[Simulación del balance hídrico mediante la geomática en la cuenca del río Cañete]

Método Hargreaves:

*Formula simplificada.

$$ETP = 0,0023 (t_{med} + 17,78) R_o * (t_{max} - t_{min}) 0,5$$

(1)***Donde:**

ETP= evapotranspiración potencial diaria, mm/día

Tmed = temperature media diaria, °C

Ro = Radiación solar extraterrestre, en mm/día

(tabulada)

Tmax = temperature diaria máxima

Tmin = temperature diaria mínima

Los instrumentos de recolección que se emplearon son: registros de información realizando cálculos meteorológicos. Además, se utilizó el método de ISOYETAS aplicando el software ArGIS para determinar el balance hídrico en el río Cañete. También se utilizó el método Hargews para realizar la simulación.

Método Thomthwaite

$$P = ETR + ES + I$$

(2)

Donde:

P= Captación

ETR= Evapotranspiración

ES=Escorrentia superficial

I: Infiltración

Resultados

1. Se calculó el balance hídrico mediante el Software ArGis, teniendo en cuenta las variables de precipitación, y temperaturas, máxima mínima y media.

2. Se tomó como población la cuenca del río Cañete.
3. Se colocó como muestra no probabilística.
4. Las técnicas aplicadas de recolección de datos son: documentos, registros y estos han sido obtenidos de la base datos de SENAMHI y del observatorio del agua ANA.

Discusion

Martínez et al. (2006) indican un desplazamiento del frente estuarico del Río de la Plata de aproximadamente 300 km sobre la costa uruguaya, y una temperatura del agua mayor que la actual para la latitud considerada. Por su parte, Zaburlín et al. (2014) advierten de una especie invasora en la región y que es probable que en un futuro cercano se extienda a los tramos inferiores del río Paraná como consecuencia de una dispersión pasiva a través del cauce principal.

Juárez Pulache (2029), en su investigación sobre el balance hídrico mediante simulación numérica con Python en la Microcuenca Apacheta, Región Ayacucho, 2005 -2019, afirma que los parámetros de entrada que se tomaron en cuenta para la determinación del balance hídrico son: precipitación, evapotranspiración e infiltración. Para calcular la precipitación se aplicó el método de Thiesen; para calcular la evapotranspiración, el método de Thorntwaite; para calcular la infiltración, el método de Gremm Ampt. Las medidas de las variables de entrada de precipitación y evapotranspiración se obtuvieron de las estaciones meteorológicas ubicadas en la subcuenca Allpachaca – Chillarazo y de la variable infiltración se realizó mediante una muestra de suelo. En ambos casos se aplicó diferentes métodos matemáticos. Además, indica que el lenguaje de programación Python V.3 es un lenguaje libre y nuevo en el medio y sencillo de programar. Es actualizado y posee varias librerías para la programación en el área que se desea utilizar.

Conclusiones

Los parámetros de entrada que se tomaron en cuenta para la determinación del balance hídrico son: precipitación, evapotranspiración e infiltración. Para calcular la precipitación se aplicó el método Thomthwaite y para calcular la evapotranspiración se aplicó el método de Hargreaves. Las medidas de las variables de entrada de precipitación y evapotranspiración se obtuvieron de las estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca del río Cañete y de la variable infiltración se realizó mediante una muestra de suelo. En ambos casos se aplicó diferentes métodos matemáticos. Todo ello se realizó utilizando el software ArGis.

Referencias

González-Otoya, V. E. (2020). Los balances hídricos y los indicadores de atención de las demandas. *AGUA Y MÁS - Revista de la Autoridad Nacional del Agua*. <https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/2527/ANA0001295.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

UNESCO (2020). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídrico: Agua y Cambio Climático*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373611.locale=es>

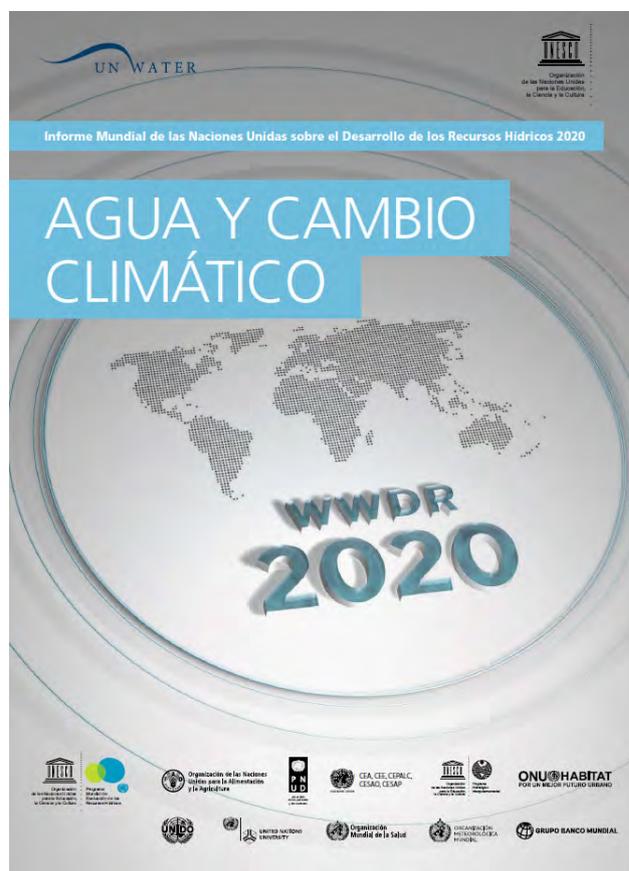
Juárez Pulache, J. C. (2019). *Evaluación Del Balance Hídrico Mediante Simulación Numérica Con Python En La Microcuenca Apacheta, Región Ayacucho, 2005 – 2019* [Proyecto de investigación, Universidad Nacional San Cristobal de Huamanga]. https://enlinea.unsch.edu.pe/oficinas/vri/wp-content/uploads/2020/10/29Proyecto-2019_Ju%C3%A1rez-Pulache.pdf

Martínez, S., Rojas, A., Ubilla, M., Verde, M., Perea, D., & Piñeiro, G. (2006). Molluscan assemblages from the marine Holocene of Uruguay: composition, geochronology, and

paleoenvironmental signals. *Ameghiniana*, 43, 385-397.

Zaburlín, N., Boltovskoy, A., Rojas, C., & Rodriguez, R. (2014). Primer registro del dinoflagelado invasor *Ceratium furcoides* (Levander) Langhans 1925 en la Argentina y su distribución. *Limnetica*, 33, 153-159.

INDECI (2019). *Boletín Informativo Hidrológico Indeci*, N° 105 del 07-03-19.



[Simulación del balance hídrico mediante la geomática en la cuenca del río Cañete]

Comportamiento de muros de adobe con aislamiento sísmico empleando *shicras* bajo carga lateral monotónica

Resumen

Gerardo Revelo Sánchez

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo - Huaraz - Perú.

<https://orcid.org/0000-0002-7136-1992>

Fidel Aparicio Roque

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo - Huaraz - Perú.

<https://orcid.org/0000-0003-1405-7588>

Fernando Arias Enriquez

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo - Huaraz - Perú.

<https://orcid.org/0000-0002-3790-1131>

Atilio López Carranza

Universidad Nacional del Santa - Chimbote, Perú.

<https://orcid.org/0000-0002-3631-2001>

Flor Jara Remigio

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo - Huaraz - Perú.

<https://orcid.org/0000-0002-4035-4765>

Debido a los limitados recursos económicos y al fácil acceso al suelo como material de construcción, los pobladores de las zonas rurales suelen construir sus viviendas con adobes, sin aplicar técnicas ni normas de diseño antisísmico. Esto hace que dichas viviendas sean altamente vulnerables frente a los sismos. En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar el comportamiento de los muros de adobe con aislamiento sísmico mediante el uso de *shicras* bajo carga lateral monotónica. Para ello, se aplicó la técnica de construcción antisísmica utilizada por la civilización Caral. Se realizó el diseño de cuatro tratamientos: T_0 (sobrecimiento convencional), T_1 (sobrecimiento de *shicras* con piedras de 5 pulg), T_2 (sobrecimiento de *shicras* con piedras de 3 pulgadas) y T_3 (sobrecimiento de *shicras* con piedras de 1 pulgada) con tres repeticiones para cada tratamiento. Los ensayos realizados en campo demostraron que los muros 7, 8 y 9, correspondientes al tratamiento T_2 lograron los mayores desplazamientos máximos, con valores de 12,83 mm, 12,12 mm y 13,09 mm en los muros 7, 8 y 9, respectivamente. Además, estos muros resistieron cargas laterales máximas de 13,43 kN, 13,92 kN y 12,94 kN. Los sobrecimientos construidos con piedras envueltas en *shicras* actuaron como un aislamiento tipo rodillo, proporcionando rigidez en el plano vertical y flexibilidad en el horizontal.

Palabras claves: Shicras, Aislamiento sísmico, Carga monotónica

Cómo citar este artículo: Revelo Sánchez, G., Aparicio Roque, F., Arias Enriquez, F., López Carranza, A., & Jara Remigio, F. (2024). Comportamiento de muros de adobe con aislamiento sísmico empleando *shicras* bajo carga lateral monotónica. *Aporte Santiaguino*, 17(2), Pág. 181–194. <https://doi.org/10.32911/as.2024.v17.n2.1191>

Recibido: 2024-08-17 | **Aceptado:** 2024-11-12



Behavior of adobe walls with seismic isolation using *shicras* subjected to monotonic lateral load

Due to limited economic resources and easy access to soil as a building material, rural dwellers often build their homes with adobes, without applying anti-seismic design techniques or standards. This makes these homes highly vulnerable to earthquakes. In this context, the present research aimed to evaluate the behavior of adobe walls with seismic isolation through the use of *shicras* under monotonic lateral loading. To do this, the anti-seismic construction technique used by the Caral civilization was applied. Four treatments were designed: T0 (conventional overhang), T1 (overhang of *shicras* with 5-inch stones), T2 (overhang of *shicras* with 3-inch stones) and T3 (overhang of *shicras* with 1-inch stones) with three replications for each treatment. The field tests showed that walls 7, 8 and 9, corresponding to the T2 treatment, achieved the highest maximum displacements, with values of 12.83 mm, 12.12 mm and 13.09 mm in walls 7, 8 and 9, respectively. In addition, these walls withstood maximum lateral loads of 13.43 kN, 13.92 kN and 12.94 kN. The foundations built with stones wrapped in *shicras* acted as a roller-type insulation, providing rigidity in the vertical plane and flexibility in the horizontal.

Keywords: Shicras, Seismic isolation, Monotonic loading

Introducción

Sánchez et al. (2021) manifiestan que el suelo es considerado como uno de los materiales de construcción más antiguos jamás conocidos. Existe evidencia arqueológica que demuestra su empleo desde hace miles de años. Gama et al. (2012) afirman que a lo largo de miles de años el adobe ha sido ampliamente empleado como material de construcción en viviendas por los pueblos indígenas en América, desde el suroeste de EE. UU. hasta Mesoamérica y la región andina de

Sudamérica. Agüero et al. (2015) argumentan que las construcciones en los países ubicados en la zona del Cinturón del Fuego del Pacífico y los que tienen presencia de fallas geológicas enfrentan un nivel elevado de vulnerabilidad ante terremotos.

Con el objetivo de reforzar los muros de adobe, Meybodan et al. (2020) evaluaron su desempeño bajo carga lateral en el plano utilizando materiales naturales como refuerzo. Entre los materiales probados, se incluyeron malla de palma adherida externamente en diferentes configuraciones, malla de plástico adherida externamente, y refuerzos con cuerda de palma y junco. Los resultados mostraron que el muro reforzado con malla de palma alcanzó una carga máxima de empuje de 52,4 kN, con un desplazamiento lateral de 17,5 mm. De manera similar, Reyes et al. (2019) investigaron el comportamiento sísmico de paredes de adobe y tierra apisonada reforzadas con mallas de acero y materiales sintéticos, demostrando la efectividad de estos refuerzos en mejorar la resistencia estructural frente a cargas sísmicas.

Zhang et al. (2022) evaluaron el desempeño sísmico de pared de adobe utilizando el método de refuerzo montado cerca de la superficie. Los materiales de refuerzo fueron vigas de mortero armado en diferentes arreglos, confinado con bambú y madera. La carga máxima de empuje fue de 98,70 kN, soportada por la pared reforzada con vigas de mortero armado en forma de diagonal en la parte central y con todos sus lados confinados, con un desplazamiento lateral de 9,92 mm. También Zhang et al. (2020) investigaron el comportamiento sísmico de un muro de adobe reforzado con acero de paredes delgadas, conformado en frío. La carga máxima de empuje soportado por el muro reforzado fue de 30,10 kN, con un desplazamiento último de 40,90 mm.

Eslami et al. (2022) propusieron un método de refuerzo interno para mejorar el desempeño lateral

cíclico en el plano de los muros de adobe. Este método consistió en el uso de cañas recubiertas de arena como material de refuerzo, configuradas en diferentes arreglos: tres cañas verticales, cinco cañas verticales, cinco cañas verticales con siete horizontales, y cinco cañas verticales con siete horizontales partidas. Los resultados mostraron que el muro reforzado con cinco cañas verticales y siete horizontales partidas alcanzó la mayor carga máxima de empuje, con un valor de 44,36 kN, acompañado de un desplazamiento lateral de 22,36 mm.

Fukuyama et al. (2013) realizaron la prueba de mesa vibratoria para investigar las propiedades de respuesta a terremotos de los cimientos de *shicra* del santuario de Caral. Construyeron *shicras* que envolvieron piedras de 15 a 20 cm de diámetro, donde se observó que los aislamientos en la base con *shicra* rodaron durante la vibración como si fuera un aislamiento tipo rodillo. En los años posteriores, Fukuyama et al. (2016) investigaron la importancia de las técnicas antiguas de 3500 a 5000 A.C. para reducir la aceleración de la respuesta sísmica en las antiguas subestructuras con *shicras* llenas de piedras.

Un estudio sobre el empleo de *shicras* fue realizado por Aguilar et al. (2019). Evaluaron el efecto sísmico de aplicación de *shicras* en muros de adobe en zonas altoandinas de la provincia de Concepción – Junín. Esta técnica demostró una liberación de energía sísmica. La de dos capas tuvo mayor eficiencia.

El 15 de agosto de 2007 un terremoto de 8,0 grados en la escala de Richter ocurrió en la costa Centro Sur del Perú. Causó un impacto significativo en la región Ica. Aproximadamente 600 personas perdieron la vida. Los principales daños se produjeron en las viviendas hechas con muros de adobe (Blondet et al., 2011).

Según Salazar (2022), el 31 de mayo de 1970 la región Áncash sufrió uno de los terremotos más grandes de la historia del Perú, con una magnitud de 7,9 grados en la escala de Richter. Las casas hechas de paredes gruesas de adobe y techos de tejas no soportaron

la fuerza sísmica. Clarke (2015) manifiesta que a causa del terremoto de 1970 murieron en total 60 mil personas y otros 140 mil resultaron heridas. El 80 % de viviendas en la zona afectada colapsaron o sufrieron daños estructurales de gran consideración. En la sierra, miles de casas de adobe se derrumbaron produciendo mayor cantidad de víctimas.

En el análisis del comportamiento de los muros de adobe se utiliza piedras envueltas con *shicras* como un sobrecimiento, donde se determina el desplazamiento máximo y forma de falla debido a una carga lateral.

Modos de falla en muros de adobe por sismo en el plano

La forma en la que la mampostería colapsa durante un terremoto, ya sea dentro o fuera del plano, está determinada por diversos factores como la calidad de los materiales utilizados, la relación de esbeltez, la masa de la estructura, la vibración generada y el tamaño de la carga vertical que se aplica sobre el elemento estructural (Preciado, 2011).

Agrietamiento diagonal (AD). - La falla por corte diagonal se da cuando la resistencia a tensión de la mampostería es excedida debido a la combinación de esfuerzos cortantes y verticales.

Deslizamiento (D). - La falla por deslizamiento y cortante tiene lugar cuando las fuerzas verticales son mínimas y las juntas de mortero no ofrecen una resistencia significativa.

Balaceo (B). - Esta falla se presenta cuando la capacidad de resistencia al esfuerzo cortante de la mampostería es elevada y las cargas aplicadas generan un momento mucho mayor al esfuerzo cortante.

Aplastamiento en Pie de Muro (AP). - La falla se genera debido al efecto de puntal que ocurre cuando el cuerpo del muro se separa de los elementos de confinamiento (Calderón, 2005).

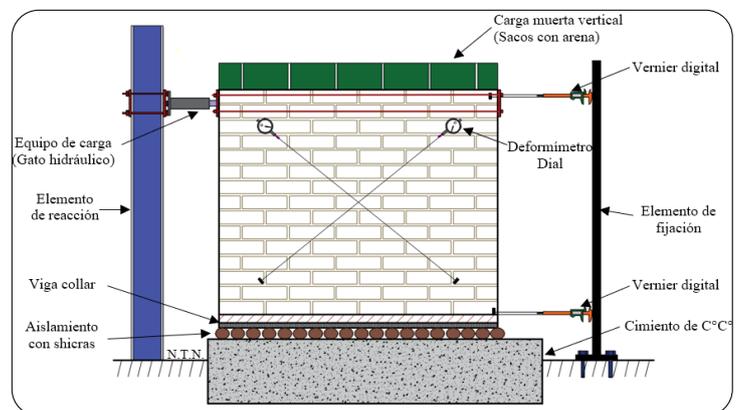
Materiales y métodos

La investigación se basa en las teorías sobre el uso de las *shicras* como aislamiento sísmico. Barbachán et al. (2022) mencionan que el Perú se encuentra ubicado en una zona propensa a terremotos. Conocedores de este problema, nuestros antepasados aplicaron la técnica de *shicras* en la base de sus estructuras de importancia para minimizar los efectos. Es un sistema sismorresistente que libera parte de la energía sísmica para transformarla en energía cinética. Altamirano y Bueno (2011) manifiestan que en la civilización Caral utilizaron la técnica de las *shicras* como disipadores de energía en sus estructuras. Las instalaron dentro de las paredes y bases de los templos.

La investigación fue aplicada, con un nivel de investigación explicativa y diseño de investigación experimental. El diseño estadístico fue completamente al azar (DCA). La población estuvo conformada por 4 tratamientos y 3 muestras (repeticiones) por cada población.

Los muros de adobe fueron diseñados con diferentes tratamientos en el sobrecimiento: T_0 : sobrecimiento convencional de barro y piedras, T_1 : sobrecimiento con piedras de 5 pulgadas de diámetro envueltas con *shicras* elaboradas con drizas, T_2 : sobrecimiento con piedras de 3 pulgadas de diámetro envueltas con *shicras* elaboradas con drizas y T_3 : sobrecimiento con piedras de 1 pulgada de diámetro envueltas con *shicras* elaboradas con drizas.

Figura 1
Esquema de ensayo en muro bajo carga lateral monotónica



Unidades de adobe

Las unidades de adobe fueron elaboradas de acuerdo a la Norma Técnica Peruana E.080 del RNE y el *Manual de construcción de edificaciones antisísmicas de adobe* del Ministerio de vivienda. Las medidas de los adobes han sido de 0,40 m de ancho por 0,40 m de largo y 0,12 m de alto.

Pruebas de laboratorio

Se realizaron los ensayos de compresión de cubos, ensayo brasileño a la tracción, ensayo de mortero a la tracción indirecta y ensayo de compresión de pilas y ensayo de tracción indirecta en muretes. Estos ensayos estuvieron de acuerdo a la Norma Técnica Peruana E.080 del RNE y fueron realizados en el laboratorio Mathlab Ingeniería Sismorresistente E. I. R. L., con equipos certificados y calibrados para ensayos de materiales.

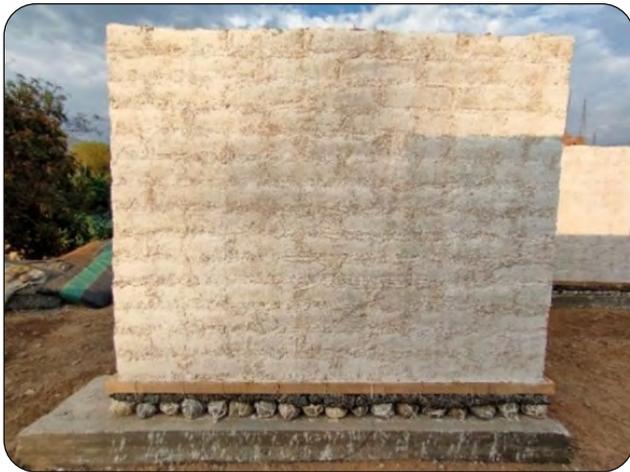
Ensayo de carga lateral monotónica

Las *shicras* rellenas de piedra fueron utilizadas como núcleos en las construcciones de la cultura Caral. Se evidenció que son capaces de atenuar las energías sísmicas. Teniendo en cuenta esta técnica ancestral, se adaptaron los muros experimentales para ser sometidos a carga lateral monotónica y evaluar el desplazamiento máximo y modo de falla. Se utilizó la máquina universal de ensayos, certificado y calibrado por el laboratorio de metrología AG4 Ingeniería y Metrología S. R. L.

Los muros de adobe tuvieron la medida de 2,50 m de largo, 2,00 m de alto y 0,40 m de ancho. La carga muerta vertical representó el peso de la cubierta (peso propio y carga viva) de la vivienda, determinado mediante el metrado de carga igual a 0,50 ton. La mampostería de adobe fue construida con unidades de adobe tradicional (barro y paja) y asentada con mortero de barro (arcilla y arena). También se usó una viga collar como capa superior del sobrecimiento, elemento estructural de madera de espesor de 0,08 m. También se empleó *shicra* con piedras de ½ pulgada como capa intermedia del sobrecimiento de espesor de 0,04 a 0,07 m. Además, *shicras* con piedras para los diferentes tratamientos como capa inferior del sobrecimiento. Cimiento de concreto ciclópeo 1:10 + 30 % piedra grande con una profundidad de 0,60 m. y ancho de 0,60 m.

Figura 2

Muro con sobrecimiento de shicras con piedras de 5 pulgadas



Resultados y discusión

Ensayos en laboratorio

Se realizaron los ensayos en laboratorio para conocer las propiedades mecánicas del adobe y el mortero. Los resultados se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 1

Ensayos en laboratorio de las propiedades mecánicas del adobe y mortero

Muestra	Resistencia a compresión en cubos (kg/cm ²)	Resistencia a tracción indirecta cilindros (kg/cm ²)	Resistencia a tracción indirecta mortero (kg/cm ²)
1	20,63	1,17	0,26
2	20,77	2,30	0,19
3	18,10	2,66	0,22
4	20,20	2,82	0,15
5	16,30	2,98	0,17
6	16,88	2,22	0,21

Según los resultados de resistencia última, a compresión en cubos, el promedio de las cuatro mejores muestras es 19,93 kg/cm², superando a lo indicado en la NTP E.080, que es igual a 10,20 kg/cm². De acuerdo a lo establecido en la NTP E.080, el promedio de la resistencia a la tracción indirecta en cilindros de las cuatro mejores muestras ensayadas es 2,69 kg/cm², siendo mayor a la resistencia última de 0,81kg/cm².

De acuerdo a lo indicado en la NTP E.080, el promedio de la resistencia a tracción indirecta en mortero de las cuatro mejores muestras ensayadas es igual a 0,22 kg/cm², siendo mayor a la resistencia última de 0,12 kg/cm².

De acuerdo a lo establecido en la NTP E.080, el promedio de la resistencia a la compresión en pilas de las cuatro mejores muestras es de 10,66 kg/cm², superando a la resistencia ultima de 6,12 kg/cm². Según los resultados, el promedio de las cuatro mejores muestras a compresión diagonal es 0,33 kg/cm². Este valor es mayor a la resistencia última indicada de 0,25 kg/cm².

[Comportamiento de muros de adobe con aislamiento sísmico empleando *shicras* bajo carga lateral monotónica]

Ensayo de muros a carga lateral monotónica

Tabla 2

Resumen de los resultados y comparación con todas las muestras de prueba en los muros de adobe

Tratamiento	Muro de abobe	Carga máxima lateral (kN)	Desplazamiento a carga máxima (mm)	Modo de falla
T ₀	1	18,22	0,00	AD
	2	19,32	0,00	AD
	3	19,14	0,00	AD
	4	16,01	5,97	AD
T ₁	5	15,33	6,68	AD
	6	15,76	6,22	AD
	7	13,43	12,83	AD
T ₂	8	13,92	12,12	AD
	9	12,94	13,09	AD
T ₃	10	16,13	5,15	AD
	11	17,17	4,07	AD
	12	16,50	4,54	AD

Los muros con sobrecimiento convencional (T₀) soportaron mayor fuerza lateral sin desplazamiento en la base, presentando un modo de falla por agrietamiento diagonal. Los muros con sobrecimiento de *shicras* con piedras de 3 pulgadas (T₂) soportaron menor carga lateral y mayor desplazamiento en la base, presentando un modo de falla por agrietamiento diagonal. De acuerdo a lo indicado por Fukuyama et al. (2013), se comprueba que todos los sobrecimientos de *shicras* rodaron durante el ensayo como si fueran un aislamiento tipo rodillo. Se comprueba que las *shicras* liberan energía sísmica a través del rodamiento de las piedras (Aguilar et al., 2019).

La carga lateral máxima de 19,32 kN y el desplazamiento máximo de 13,09 mm no superaron a los resultados mostrados por Meybodan et al. (2020) y Eslami et al. (2022) en sus investigaciones, donde las cargas laterales fueron de 52,4 kN y 44.36 kN y los desplazamientos de 17,5 mm y 22.36 mm respectivamente.

Análisis de varianza de la carga lateral máxima

Tabla 3

Prueba de homogeneidad de varianza de los datos de carga lateral máxima

	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Se basa en la media	0,409	3	8	0,751
Se basa en la mediana	0,097	3	8	0,959
Se basa en la mediana y con gl ajustado	0,097	3	5,851	0,959
Se basa en la media recortada	0,378	3	8	0,772

Tabla 4

Análisis de varianza de la carga lateral máxima para los diferentes tratamientos

Fuente de variación (FV)	Grado de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrados medios (CM)	Valor de F	Pr (>F)
Tratamientos	3	45,987	15,329	62,286	6.88e-06
Residuos	8	1,969	0,246		
Total	11	47,956			

Se ha planteado como hipótesis nula que en ninguno de los tratamientos empleando *shicras* como aislamiento sísmico influye significativamente en el comportamiento de los muros de adobe bajo carga lateral monotónica.

El valor de p es menor a 0,05, por lo que existe significancia entre las medias de los tratamientos para la fuerza lateral máxima soportada, por lo que se rechaza la hipótesis nula. En tal sentido, los tratamientos con aislamiento sísmico empleando *shicras* influyen en el comportamiento del muro.

Se demuestra que los muros de sobrecimientos con piedras de 3 pulgadas de diámetro, envueltas

con *shicras*, han soportado menor carga lateral antes de la falla, lo que indica que no son rígidos horizontalmente como los muros de adobe con cimientos convencionales que fallan repentinamente ante un evento sísmico. Teniendo en cuenta estos resultados y los materiales utilizados se puede adoptar para la construcción de viviendas con adobe.

Tabla 5

Prueba Post Hoc de Duncan para la carga lateral máxima

Tratamiento	N	Sub conjuntos para alfa = 0.05		
		1	2	3
Tratamiento 2	3	13,43		
Tratamiento 1	3	15,70		
Tratamiento 3	3	16,60		
Tratamiento 0	3	18,89		
Sig.		1,00	0,06	1,00

De la prueba de comparación de medias Duncan, se determina que no existe diferencia significativa entre los tratamientos T₁ y T₃ para la fuerza lateral máxima, teniendo un comportamiento similar.

Análisis de varianza del desplazamiento máximo

Tabla 6

Prueba de homogeneidad de varianza de los datos de desplazamiento máximo

	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Se basa en la media	2,446	3	8	0,139
Se basa en la mediana	1,106	3	8	0,402
Se basa en la mediana y con gl ajustado	1,106	3	5,404	0,424
Se basa en la media recortada	2,342	3	8	0,149

Tabla 7

Análisis de varianza del desplazamiento máximo para los diferentes tratamientos

Fuente de variación (FV)	Grado de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrados medios (CM)	Valor de F	Pr (>F)
Tratamientos	3	247,965	82,655	489,782	2.11e-09
Residuos	8	1,350	0,169		
Total	11	249,315			

El valor de p es menor a 0,05, por lo que existe significancia entre las medias de los tratamientos para el desplazamiento máximo en la base. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula. En tal sentido, los tratamientos con aislamiento sísmico empleando *shicras* influyen en el comportamiento del muro.

Tabla 8

Prueba Post Hoc de Duncan para el desplazamiento máximo

Tratamiento	N	Sub conjuntos para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
Tratamiento 0	3	0,00			
Tratamiento 3	3		4,59		
Tratamiento 1	3			6,29	
Tratamiento 2	3				12,68
Sig.		1,00	1,00	1,00	1,00

De la prueba de comparación de medias Duncan se determina que existe diferencia significativa entre los tratamientos T_0 , T_1 , T_2 y T_3 para el desplazamiento máximo en la base del muro.

Se ha evidenciado que los muros con sobrecimientos de piedras de 3 pulgadas de diámetro, envueltas con *shicras*, se han desplazado más que otros tratamientos, semejante a los aisladores tipo rodillo, lo que indica que ante un evento sísmico se comportan elásticamente y pueden contrarrestar el movimiento.

Conclusiones

De la evaluación del comportamiento de los muros con sobrecimiento convencional y *shicras* sometido a carga lateral monotónica, se concluye que los muros de adobe 7, 8 y 9 correspondientes al tratamiento T_2 con piedras de 3 pulgadas envueltas con *shicras*, mostraron desplazamientos máximos de 12,83 mm, 12,12 mm y 13,09 mm respectivamente, siendo mayores a los otros tratamientos. Además, resistieron menores cargas laterales máximas de 13,43 kN, 13,92 kN y 12,94 kN respectivamente antes de la falla. Con eso se demostró que las *shicras* con piedras de 3 pulgadas son capaces de disipar la energía ante un evento sísmico. Todos los muros presentaron un modo de falla por agrietamiento diagonal por corte en las juntas. Las *shicras* se comportaron como un aislamiento tipo rodillo dando rigidez vertical y flexibilidad horizontal.

Referencias

- Agüero, J., Cerón, J., Gonzales, J. & Méndez, M. (2015, 9-13 de noviembre). *Análisis estructural de dos muros de adobe con diferentes sistemas de aparejo*. Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra, Ecuador. <https://dialnet.unirioja.es/download/articulo/6085978.pdf>
- Aguilar, L., Guzmán, L., & Sauñi, C. (2019). Efecto sísmico de aplicación de Shicras en muros de adobe en zonas altoandinas de la provincia de Concepción - Junín. <https://acortar.link/tzGnXO>
- Altamirano, A. J., & Bueno, A. (2011). El Ayni y la Minka: dos formas colectivas de trabajo de las sociedades pre-Chavín. *Investigaciones Sociales*, 15(27), 43-75. <http://dx.doi.org/10.15381/is.v15i27.7659>

- Barbachán, E. A., Barbachán, M. A., Cáceres, J. J., Ruiz, C. N., & Casas, E. R. (2022). Soluciones tecnológicas ancestrales y su aplicación en tiempos actuales. *Universidad y Sociedad*, 14(S1), 476-486. <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/2658>
- Blondet, M., Vargas, J., Tarque, N., & Iwaki, C. (2011). Construcción sismorresistente en tierra: la gran experiencia contemporánea de la Pontificia Universidad Católica del Perú. *Informes de la Construcción*, 63(523), 41-50. <https://doi.org/10.3989/ic.10.017>
- Calderón, A. D. (2005). *Modelación inelástica de mampostería confinada ante carga lateral* [Proyecto de Grado, Universidad de los Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/22704/u270997.pdf?sequence=1>
- Clarke, N. (2015). Revolutionizing the Tragic City: Rebuilding Chimbote, Peru, after the 1970 Earthquake [Revolucionando la ciudad trágica: reconstruyendo Chimbote, Perú, después del terremoto de 1970]. *Journal of Urban History*, 41(1), 93-115. <https://doi.org/10.1177/0096144214552392>
- Eslami, A., Mirabi, H., & Ronaghb, H. (2022). Sand-coated reeds as an innovative reinforcement for improving the in-plane seismic behavior of adobe walls [Carrizos recubiertos de arena como refuerzo innovador para mejorar el comportamiento sísmico en el plano de muros de adobe]. *Construction and Building Materials*, 326, 126882. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126882>
- Fukuyama, H., Fujisawa, M., Abe, A., Kabeyasawa, T., Shirane, Z., Saito, T., & Aguilar, Z. (2013). Shaking Table Test on Seismic Response Properties of “Shicras,” Stones Wrapped in Vegetable Fiber Bags [Prueba de mesa vibratoria sobre las propiedades de respuesta sísmica de las “shicras”, piedras envueltas en bolsas de fibra vegetal]. *Journal of Disaster Research*, 8(3), 526-533. <https://doi.org/10.20965/jdr.2013.p0526>
- Fukuyama, H., Fujisawa, M., Abe, A., Kabeyasawa, T., & Shirane Z. (2016). Research on earthquake response reduction properties and its repeatability of the foundation technology used in the sanctuaries dating up to 5,000 years ago [Investigación sobre las propiedades de reducción de la respuesta a terremotos y su repetibilidad de la tecnología de cimentación utilizada en los santuarios que datan de hace 5.000 años]. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, 16(11), 11-25. https://doi.org/10.5610/jaee.16.11_11
- Gama, J., Tamara, C., Pi-Puig, T., Alcalá, R., Cabadas H., Jasso, C., Díaz, J., Sánchez, S., López, F., & Vilanova, A. (2012). Arquitectura de tierra: el adobe como material de construcción en la época prehispánica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(2), 177-178.
- Meybodan, H., Eslami, A., & Morshed, R. (2020). Sustainable lateral strengthening of traditional adobe walls using natural reinforcements [Fortalecimiento lateral sostenible de muros tradicionales de adobe mediante refuerzos naturales]. *Construction and Building Materials*, 260, 119892. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119892>
- Reglamento Nacional de Edificaciones (2022). *Norma E.080 de Diseño y construcción con tierra reforzada* (16 ed.). Megabyte.

- Sánchez, C., Alonso, E. M., & López, M. C. (2021). Vulnerabilidad sísmica y la pérdida de la vivienda de adobe en Jojutla, Morelos, México, tras los sismos de 2017. *Viviendas y Comunidades Sustentables*, (10), 9-29. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v2i10.162>
- Salazar, J. A. (2022). Huaraz a 52 años del terremoto de 1970: lecciones no aprendidas. *Enfermedades y Desastres Sociales*, 14(1), 1-23. <http://dx.doi.org/10.21142/des-1401-2022-0006>
- Zhang, L., Zhou, T., Zhang, Z., Tan, W., & Liang, Z. (2022). Near-surface-mounted retrofitting of adobe walls using different materials: Evaluation of seismic performance [Reforzamiento cercano a la superficie de muros de adobe utilizando diferentes materiales: Evaluación del desempeño sísmico]. *Structures*, 54(137), 1149-1163. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.05.137>
- Zhang, J., Pang, S., Gao, J., Deng, E., Wang, H., & Zhao, J. (2020). Experimental study on seismic behaviour of adobe wall reinforced with cold-formed thin-walled Steel [Estudio experimental sobre el comportamiento sísmico de un muro de adobe reforzado con acero de paredes delgadas conformado en frío]. *Thin-Walled Structures*, 147, 106493. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106493>

Ecuaciones empíricas para la estimación de las intensidades de lluvias máximas anuales de diferentes duraciones y períodos de retorno, Huaraz – Perú

Resumen

Toribio Reyes Rodríguez

Ingeniero Agrícola, Maestro en Ciencias e Ingeniería- Gestión Ambiental, Doctor en Economía, y Doctor en Ingeniería Ambiental. Dedicado al Diseño, Gestión, Evaluación de Impacto Ambiental e Investigación Científica de Obras Hidráulicas, Hidrología e Hidroeconomía.

<https://orcid.org/0000-0002-4017-6153>
treyes2@gmail.com

El objetivo del trabajo de investigación fue obtener ecuaciones empíricas de estimación de las intensidades de precipitaciones máximas anuales de diferentes duraciones y períodos de retorno en la ciudad de Huaraz, que sirvan para el diseño hidrológico de estructuras hidráulicas de drenaje pluvial. Las precipitaciones máximas anuales en 24 horas de la estación meteorológica Santiago Antúnez de Mayolo se ajustan mejor a la distribución de probabilidades Gumbel. Para este propósito, se empleó el software MINITAB 20. Con la ecuación de Dyck – Peschke, las precipitaciones máximas anuales se desagregaron para duraciones menores de 24 horas. Con estos valores desagregados se obtuvieron las ecuaciones empíricas de las intensidades de precipitaciones máximas anuales de diferentes duraciones en la estación meteorológica Santiago Antúnez de Mayolo. La ecuación de Koutsoyannis es la más adecuada para las intensidades de precipitación para duraciones menores de 24 horas y diferentes períodos de retorno para la estación meteorológica Santiago Antúnez de Mayolo – Huaraz.

Palabras clave: Intensidad de precipitación, Duración, Período de retorno, Distribución Gumbel

Cómo citar este artículo: Reyes Rodríguez, T. (2024). Ecuaciones empíricas para la estimación de las intensidades de lluvias máximas anuales de diferentes duraciones y períodos de retorno, Huaraz – Perú. *Aporte Santiaguino*, 17(2), Pág. 195–206. <https://doi.org/10.32911/as.2024.v17.n2.1194>

Recibido: 2024-09-20 | **Aceptado:** 2024-11-20



Empirical equations for estimating the intensities of maximum annual rainfall of different durations, Huaraz – Peru

The objective of the research work was to obtain empirical equations for estimating the intensities of maximum annual rainfall of different durations and return periods in the city of Huaraz, which serve for the hydrological design of hydraulic storm drainage structures. The maximum annual rainfall in 24 hours from the Santiago Antúnez de Mayolo meteorological station best fits the Gumbel probability distribution, for this purpose the MINITAB 20 software was used. With the Dyck – Peschke equation, the maximum annual rainfall was disaggregated for durations of less than 24 hours. With these disaggregated values, the empirical equations of the intensities of maximum annual rainfall of different durations at the Santiago Antúnez de Mayolo meteorological station were obtained. The Koutsoyannis equation is the most appropriate for precipitation intensities for durations less than 24 hours and different return periods for the Santiago Antúnez de Mayolo – Huaraz meteorological station.

Keywords: Precipitation intensity, Duration, Return period, Gumbel Distribution

Introducción

La ciudad de Huaraz se caracteriza por ser lluviosa. Por eso, se requiere realizar diseños de estructuras de drenaje pluvial tales como alcantarillas pluviales en las calles, zanjas de desvío y cunetas en las carreteras y otras estructuras de drenaje. Para la estimación de los caudales de diseño se emplea la ecuación racional o de Mac Math, siendo una de las variables la intensidad de la precipitación para una determinada duración y período de retorno.

En el Perú, se dispone de registros de precipitaciones máximas anuales en 24 horas. Pero, para precipitaciones máximas anuales con menos de 24 horas, los datos son escasos. Por ello, se tuvo como objetivo la generación de ecuaciones empíricas de las intensidades de lluvias máximas anuales de diferentes duraciones y períodos de retorno en la ciudad de Huaraz.

Yamoat et al. (2023) destaca la importancia de la propiedad de invariancia de escala temporal en los patrones de lluvia; es decir, la repetición de estos patrones a diferentes escalas temporales. Este comportamiento se tiene en cuenta en la predicción de eventos extremos como inundaciones o sequías.

A falta de datos de precipitaciones máximas de corta duración, se pueden utilizar los datos del satélite TRMM, que comprenden duraciones de 3 a 24 horas. Además, se constata que las precipitaciones máximas en intervalos de 5 minutos a 2 horas son bastante constantes en diferentes climas debido a la similitud de las tormentas convectivas (Awadallah, 2011).

Para la elaboración de las curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF), se necesitan datos de precipitaciones máximas anuales de alta resolución, obtenidos de una red densa de estaciones pluviométricas, con mediciones de al menos una vez por hora durante un periodo mínimo de 20 años. La modelización de las curvas IDF se basa en el supuesto de estacionariedad de la serie temporal; no obstante, en el contexto del cambio climático, este supuesto ya no es válido por que se requiere actualizar las curvas IDF (Kourtis & Tsihrintzis, 2022).

Según Hu y Ayyub (2019), los algoritmos de aprendizaje automático (ML) permiten reducir la escala temporal de las precipitaciones máximas anuales de 24 horas a escalas temporales menores. Las intensidades de precipitación de corta duración tienen un impacto significativo en el diseño de sistemas de drenaje pluvial.

La desagregación de las precipitaciones puede realizarse desde enfoque temporal como espacial. Las redes neuronales artificiales (RNA) permiten identificar, clasificar y predecir patrones no lineales en fenómenos naturales, como la agregación y desagregación de las precipitaciones (Kim & Singh, 2015).

Monjo y Mesenguer-Ruiz (2024) precisa que los valores del exponente de Hurst varían entre 0 y 1. Las series temporales se clasifican según este exponente. Así, un valor de $H = 0,5$ sugiere que la serie es aleatoria; si $0 < H < 0,50$ indica una serie antipersistente; y si $0,5 < H < 1,0$ señala una serie persistente. El exponente de Hurst se relaciona con la dimensión fractal D de la serie temporal mediante la siguiente ecuación $D = 2 - H$.

Gamarra (2021), en el artículo “Metodología para la estimación de parámetros de cálculo de tormentas de diseño con datos pluviométricos en Bolivia”, encontró que el exponente de la ecuación para la desagregación de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas a otras precipitaciones máximas anuales de D minutos de duración varía de 0,231 a 0,377 con un valor promedio de 0,294. El valor de n se puede regionalizar en función a la latitud, longitud y altitud.

$$P_D = P_{24} \left(\frac{D}{1440} \right)^n \quad 1$$

Villón (2020) indica que la ecuación de Dyck – Peschke se emplea para la desagregación de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas a otras precipitaciones máximas anuales de D minutos de duración

$$P_D = P_{24} \left(\frac{D}{1440} \right)^{1/4} \quad 2$$

En las ecuaciones (1) y (2), P_D designa la precipitación máxima anual (mm) para una duración de D minutos, que varía de 15 minutos a 1440 minutos. P_{24} designa la precipitación máxima anual (mm) en 24

horas y D representa la duración de la precipitación máxima anual en minutos.

Villón (2020) indica también que, para la agregación de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas, a otras precipitaciones máximas anuales de D horas de duración ($D > 24$ horas), se emplea la ecuación de Dyck – Peschke

$$P_D = P_{24} D^{0.40} \quad 3$$

En la ecuación (3), P_D designa la precipitación máxima anual para una duración de D horas ($D > 24$ horas); P_{24} designa la precipitación máxima anual en 24 horas y D representa la duración de la precipitación máxima anual en horas.

Álvaro (2020) indica la ecuación de desagregación de precipitaciones máximas anuales en 24 horas empleadas en Brasil

$$P_D = \left(\frac{D}{24,9327 + 3,8346 D^{0,7924}} \right) P_{24} \quad 4$$

En la ecuación (4), P_D representa la precipitación máxima anual en D minutos, D representa la duración de la precipitación, acotada a menos de 1440 minutos. Por otro lado, P_{24} designa la precipitación máxima anual medida en 24 horas, expresada en milímetros.

Gamarra (2021) indica que la ecuación de Grunsky se emplea en Bolivia para la desagregación de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas a otras precipitaciones máximas anuales de D horas de duración.

$$P_D = P_{24} \left(\frac{D}{1440} \right)^{1/2} \quad 4$$

En la ecuación (5), P_D designa la precipitación máxima anual para una duración de D horas, P_{24} designa la precipitación máxima anual en 24 horas y D representa la duración de la precipitación máxima anual en minutos.

Priambodo et al. (2019) empleó la ecuación de Mononobe para la desagregación de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas en la isla de Java (Indonesia) a otras precipitaciones máximas anuales de D minutos de duración.

$$P_D = P_{24} \left(\frac{D}{1440} \right)^{1/3} \quad 6$$

En la ecuación (6), P_D designa la precipitación máxima anual para una duración de D horas; P_{24} designa la precipitación máxima anual en 24 horas y D representa la duración de la precipitación máxima anual en minutos.

Linsley et al. (1988) precisa que para el análisis probabilístico se requieren por lo menos datos de 20 años de registro para que el análisis de frecuencias sea confiable.

Para obtener resultados confiables en los análisis probabilísticos, se requiere al menos 20 años de datos para incluir los ciclos meteorológicos que afectan las precipitaciones extremas.

Chow et al. (1994) indica las ecuaciones para la estimación de las intensidades de lluvias máximas anuales.

$$I = \frac{aT^b}{(D+c)} \quad 7$$

$$I = \frac{aT^b}{(D^c+d)} \quad 8$$

En las ecuaciones (7) y (8), I designa la intensidad máxima anual, T representa el período de retorno, D la duración; a , b , c y d son parámetros de las ecuaciones. A la ecuación también se conoce como la ecuación de Kimijima.

Pereyra-Díaz (2012), en su artículo “Dos modelos matemáticos no lineales para estimar la intensidad - duración - período de retorno de eventos de lluvia”, muestra la ecuación de Koutsoyiannis.

$$I = a \left(\frac{b - \ln(-\ln(1 - \frac{1}{T}))}{(D+c)^d} \right) \quad 9$$

En la ecuación (9), I designa la intensidad de la precipitación, T representa el período de retorno, D representa la duración de la precipitación máxima anual y a , b , c , d son parámetros de la ecuación.

McCuen (2005) precisa que para estimar el tiempo de concentración de una cuenca basado en el análisis de la onda cinemática de la escorrentía superficial se emplea la ecuación

$$t_c = 6.978 \frac{L^{0.6} n^{0.6}}{i^{0.4} S_c^{0.3}} \quad 10$$

En la ecuación (10), t_c designa el tiempo de concentración (min), L representa la longitud de la superficie (m), n designa el coeficiente de rugosidad de Manning, i representa la intensidad de lluvia (mm/h) y S_c denota la pendiente de la superficie (m/m).

McCuen (2005) indica que el coeficiente de determinación múltiple (R^2) es igual a la proporción de la variación de la variable dependiente, que es explicada por la ecuación empírica. Alternativamente, el coeficiente de determinación es una medida estadística que indica la proporción de la variación de una variable dependiente que es explicada por una o más variables independientes en un modelo de regresión. Matemáticamente, se expresa de la siguiente manera:

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad 11$$

En la ecuación (11), es la variable dependiente i predicha, y_i es la variable dependiente observada, es la media aritmética de la variable dependiente observada.

Materiales y métodos

Se emplearon los registros de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas de la estación meteorológica Santiago Antúnez de Mayolo (Independencia – Huaraz) que se indica en la Tabla 1, desde el año 1996 hasta el año 2015. La estación meteorológica indicada estuvo ubicada en la siguiente coordenada geográfica: latitud $09^{\circ}30'S$, longitud $77^{\circ}31'W$ y altitud 3090 m.s.n.m.

Tabla 1

Precipitaciones máximas anuales en 24 horas, estación Santiago Antúnez de Mayolo

Año	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
P24, mm	26,6	52,5	47,4	43,0	28,0	34,8	40,5	22,4	37,7	35,8
Año	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
P24, mm	24,8	32,7	30,8	27,3	25,7	25,8	50,5	32,1	33,2	26,4

Nota. Datos obtenidos de SENAMHI (2015).

Es una aplicada, no experimental-relacional. El método de investigación empleado es el inductivo.

Las precipitaciones máximas anuales en 24 horas de la estación meteorológica Santiago Antúnez de Mayolo se sometieron a las pruebas de la bondad de ajuste con las distribuciones de probabilidades de valores extremos tipo I, lognormal – 2 y gamma. Para tal fin, se empleó el software MINITAB 20.

Las intensidades de precipitación para diferentes duraciones se obtuvieron con la ecuación de Dyck – Peschke.

$$I_D = I_{24} \left(\frac{1440}{D} \right)^{0.75} \quad 12$$

En la ecuación (12), I_D designa la intensidad de precipitación máxima anual en D minutos (mm/h); I_{24} denota la intensidad de precipitación máxima anual en 24 horas (mm/h); D representa la duración de la precipitación máxima anual en D minutos.

Las intensidades de las precipitaciones máximas anuales obtenidas para diferentes duraciones y períodos de retorno se ajustaron a las ecuaciones de Chow (1994) y Koutsoyiannis, para la determinación de los parámetros de las ecuaciones indicadas se empleó el complemento solver de excel.

Resultados

Ubicación de la estación meteorológica

La estación meteorológica Santiago Antúnez de Mayolo estuvo ubicada en la ciudad universitaria Shancayán, Independencia, Huaraz (Perú). Fue desactivada en el año 2018 para la construcción del edificio de la Facultad de Ciencias Agrarias. Estuvo ubicada en las coordenadas geográficas (longitud: 77°31'W, latitud: 09°30'S, altitud:3090 m s. n. m.). La ubicación de la estación meteorológica se indica en la Figura 1.

Figura 1

Ubicación de la estación meteorológica Santiago Antúnez de Mayolo - Huaraz



Análisis comparativo de las ecuaciones de desagregación de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas

Se realizaron comparaciones de las razones P_D/P_{24} para duraciones que varían entre 5 y 1440 minutos. En este análisis, las ecuaciones de desagregación de Grunsky, Mononobe, Dyck-Peschke y la propuesta por Álvaro (2020) proporcionan valores de precipitaciones máximas anuales en orden creciente.

Distribución de probabilidades adecuada para las precipitaciones máximas anuales en 24 horas

Las precipitaciones máximas anuales en 24 horas se ajustan mejor a la distribución de probabilidades de valores extremos tipo I (Gumbel), aunque también se

ajustan a la distribución de probabilidades gamma de dos parámetros y a la distribución lognormal de dos parámetros.

Prueba de hipótesis

H_0 : Las precipitaciones máximas anuales en 24 horas se ajustan a la distribución Gumbel

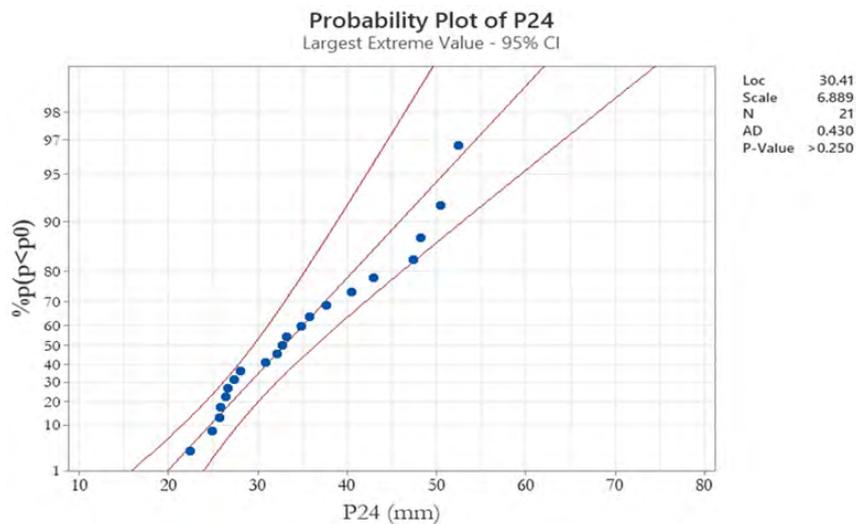
H_1 : Las precipitaciones máximas anuales en 24 horas no se ajustan a la distribución Gumbel

Decisión: $p > 0,05$ se acepta la hipótesis H_0

En la Figura 2, se indica el ajuste de los datos de precipitaciones máximas anuales en 24 horas a la distribución de probabilidades Gumbel.

Figura 2

Ajuste a la distribución de probabilidades Gumbel de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas, estación Santiago Antúnez de Mayolo



Precipitaciones máximas anuales en 24 horas (P24) para diferentes períodos de retorno

En la Tabla 2, se indican las precipitaciones máximas anuales en 24 horas y los períodos de retorno

correspondientes en la estación meteorológica Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz.

Tabla 2*Precipitaciones máximas anuales en 24 horas y períodos de retorno en la estación Santiago Antúnez de Mayolo*

T(años)	2	5	10	25	50	100	200	500
P24(mm)	33,1	41,3	46,7	53,6	58,7	61,8	63,8	75,5

Intensidades, duraciones y períodos de retorno

En la Tabla 3, se indican las intensidades máximas anuales para diferentes duraciones y los períodos de retorno correspondientes en la estación meteorológica Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz.

Tabla 3*Intensidades (mm/h) – duraciones (min) y períodos de retorno (años), estación meteorológica Santiago Antúnez de Mayolo*

T (años)	2	5	10	25	50	100	200	500
Duración (min)	Intensidades (mm/h)							
10	57,3	71,5	80,9	92,8	101,7	107,0	110,5	130,8
30	25,2	31,4	35,5	40,7	44,6	47,0	48,5	57,4
45	18,6	23,2	26,2	30,0	32,9	34,6	35,8	42,3
60	15,0	18,7	21,1	24,2	26,5	27,9	28,8	34,1
90	11,0	13,8	15,6	17,9	19,6	20,6	21,3	25,2
120	8,9	11,1	12,5	14,4	15,8	16,6	17,1	20,3
150	7,5	9,4	10,6	12,2	13,3	14,0	14,5	17,2
180	6,6	8,2	9,3	10,6	11,6	12,2	12,6	15,0
300	4,5	5,6	6,3	7,2	7,9	8,4	8,6	10,2
600	2,7	3,3	3,8	4,3	4,7	5,0	5,1	6,1

Ecuaciones empíricas generadas de intensidad – duración y período de retorno

En la ecuación (13), I designa la intensidad de precipitación máxima anual (mm/h) de D minutos de duración y T representa el periodo de retorno en años.

a) Ecuación de Ven Te Chow

$$I = \frac{327,81T^{0,13}}{D^{0,75}} \quad 13$$

$$R^2 = 0,997$$

$$ECM = 1,48 \text{ mm} / h$$

b) Ecuación de Koutsoyiannis

$$I = 66,42 \left(\frac{4,55 - \ln(-\ln(1 - \frac{1}{T}))}{D^{0,75}} \right) \quad 14$$

$$R^2 = 0,997$$

$$ECM = 0,995 \text{ mm} / h$$

En la ecuación (15), I designa la intensidad de precipitación máxima anual (mm/h) de D minutos de duración y T representa el periodo de retorno en años.

Discusión

Las precipitaciones máximas anuales en 24 horas se ajustan mejor a las distribuciones de valores extremos tipo I (Gumbel); aunque también se ajustan a la distribución Gamma y lognormal de dos parámetros.

Las ecuaciones empíricas obtenidas son válidas para la ecuación de desagregación de la precipitación máxima anual en 24 horas de Dyck-Peschke que se emplea en Perú. No obstante, es importante indicar que las razones P_D/P_{24} , correspondientes a duraciones que varían entre 5 y 1440 minutos, en orden creciente, están determinadas por las ecuaciones de desagregación de Grunsky, Mononobe, Dyck-Peschke y la propuesta por Álvaro (2020).

La ecuación de Koutsoyannis es mejor que la ecuación de Ven Te Chow porque el coeficiente de determinación (R^2) $0,999 > 0,997$ y el error cuadrático medio (ECM) $0,995 < 1,48$ mm/h. Las ecuaciones empíricas obtenidas son válidas para duraciones menores a 24 horas.

Conclusiones

La desagregación de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas se realizó utilizando la ecuación de Dyck-Peschke. Para el análisis probabilístico se empleó la distribución de probabilidades de Gumbel.

La ecuación (14) de Koutsoyannis predice mejor las intensidades de las precipitaciones máximas anuales para duraciones menores de 24 horas.

Donde I designa la intensidad de precipitación máxima anual (mm/h) de D minutos de duración y T representa el periodo de retorno en años.

Se recomienda acoplar la ecuación de Koutsoyannis con la ecuación de onda cinemática de McCuen porque permite determinar la duración e intensidad de las precipitaciones máximas anuales para un determinado periodo de retorno, la misma que se puede emplear el diseño hidrológico de estructuras de drenaje pluvial en la ciudad de Huaraz.

Referencias

- Álvaro, J. (2020). Alternative model of intense rainfall equation obtained from daily rainfall disaggregation. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 25(2). <https://acortar.link/5WzvAT>
- Awadallah, A., ElGamal, M., ElMostafa, ElBadry, H. (2011) Developing Intensity-Duration-Frequency Curves in Scarce Data Region: An Approach using Regional Analysis and Satellite Data. *Engineering*, 3, 215-226. <https://acortar.link/SqfpQN>
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill
- Gamarra, M. (2021). Metodología para la estimación de parámetros de cálculo de tormentas de diseño con datos pluviométricos en Bolivia. *Ventana Científica: 11(18)*. <https://acortar.link/hVtg5E>
- Hu, H., & Ayyub, B. (2019). Machine learning for projecting extreme precipitation intensity for short durations in changing climate. *Geosciences* 2019, 9(5). <https://acortar.link/sSJB1w>
- Kim, S., & Singh, V. (2015). Spatial disaggregation of areal rainfall using two different artificial neural networks models. *Water*. <https://acortar.link/c2Xaix>
- Kourtis, I., & Tsihrintzis, V. (2023). Update of intensity – duration – frequency (IDF) curves under climate change: a review. *Water Supply* 2(3), 49 – 51. <https://acortar.link/foXiiw>

McCuen, R. (2005). *Hydrologic analysis and design*. Pearson Prentice Hall.

Monjo, R., & Mesenguer-Ruiz, O. (2024). Review: Fractal geometry in precipitation. *Atmosphere* 2024. 15(1). <https://acortar.link/XsiV4a>

Linsley, R., Kohler, M., & Paulhus, J. (1988). *Hidrología para ingenieros*. México: McGraw-Hill

Pereyra-Díaz (2012). Two nonlinear mathematical models to estimate the intensity – duration –return period of rainfall events. *Universidad y Ciencia* 28 (3). <https://acortar.link/U94X4s>

Priambodo, S., Montarjih, L., Suhartanto, E. (2019). Hourly rainfall distribution patterns in Java island. Conferencia Web MATEC, 276. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201927604012>

Villón, M. (2020). *Hidrología*. Ediciones Villón.

Yamoat, N., Hanchowong, R., Yamoat, O., Chaimoon, N., & Kangrang, A. (2023). Estimation of regional intensity – duration – frequency relationships of extreme rainfall by simple scaling in Thailand. *Journal of Water and Climate Change* 14(3). <https://acortar.link/2FQkF3>

Revisión de literatura para el análisis del desempeño del modelo SWAT en la disponibilidad hídrica futura

Resumen

Carlos Martínez Zelaya

Escuela de post grado Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz, Perú.

<https://orcid.org/0000-0002-4017-6153>
cmartinezz@unasam.edu.pe

Fidel Aparicio Roque

Escuela de post grado Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz, Perú. Ingeniero Agrícola Ingeniero Civil Maestro en Ciencias e Ingeniería con mención en Gestión Ambiental Doctor en Ingeniería Civil Doctor en Ingeniería Ambiental.

<https://orcid.org/0000-0003-1405-7588>
daparicior@unasam.edu.pe

El cambio climático es un problema global que está afectando la disponibilidad de agua superficial a nivel mundial. Los eventos climáticos extremos van en aumento según predicciones futuras. Esto provoca cambios en los patrones de precipitación, intensificando sequías e inundaciones. El objetivo de la investigación fue realizar una revisión sistemática de artículos indexados desde el año 2014 al 2024, referidos al desempeño del modelo SWAT en la disponibilidad hídrica futura. Los materiales y métodos se basaron en dos etapas bien marcadas: la búsqueda de la literatura y la revisión de la literatura. La primera etapa corresponde a la identificación de la literatura en la base de datos de Scopus, aplicando una cadena de búsqueda en artículos publicados en los últimos 10 años. Luego, se realizó un filtro aplicando 2 criterios de selección. En la segunda etapa se integró la información; se ordenó y se extrajo lo más resaltante para el análisis. La revisión y análisis evidenció un buen desempeño del modelo SWAT en la mayoría de los estudios. En la mayoría existe una tendencia a la disminución de las precipitaciones y la disponibilidad hídrica. En conclusión, el modelo SWAT tuvo un buen desempeño en la mayoría de los estudios revisados. En las proyecciones a futuro, en la mayoría existe una tendencia a la disminución de las precipitaciones y la disponibilidad hídrica.

Palabras clave: cambio climático, disponibilidad hídrica, SWAT, revisión sistemática

Cómo citar este artículo: Martínez Zelaya, C., & Aparicio Roque, F. (2024). Revisión de literatura para el análisis del desempeño del modelo SWAT en la disponibilidad hídrica futura. *Aporte Santiaguino*, 17(2), Pág. 251–271. <https://doi.org/10.32911/as.2024.v17.n2.1181>

Recibido: 2024-09-20 | **Aceptado:** 2024-11-20



Literature review for the analysis of the performance of the SWAT model in Future Water Availability

Climate change is a global problem that is affecting the availability of surface water worldwide. Extreme weather events are increasing according to future predictions, this causes changes in precipitation patterns, intensifying droughts and floods. The objective of the research was to carry out a systematic review of articles indexed from 2014 to 2024, referring to the performance of the SWAT model in future water availability. The materials and methods were based on two well-marked stages; the literature search and literature review, the first stage corresponds to the identification of the literature in the Scopus database, applying a search string in articles published in the last 10 years, and then performing a filter applying 2 selection criteria and finally the second stage, which integrates the information by ordering it and extracting the most relevant for the analysis. The review and analysis carried out showed good performance in most of the studies that used the SWAT model in the simulations; For the most part, there is a trend toward decreased rainfall and water availability. In conclusion, the SWAT model performed well in most of the studies reviewed; In most future projections there is a trend towards a decrease in rainfall and water availability.

Keywords: climate change, water availability, SWAT, systemic review

Introducción

La presencia de agua dulce en el planeta continúa siendo fundamental para la existencia de la vida humana. Sin embargo, su reducción en la calidad y cantidad, junto con su elevada susceptibilidad al cambio climático, tiene un impacto negativo, frente a las demandas crecientes (Dahal et al., 2020; Reshma & Arunkumar, 2023). La

evidencia de los datos climatológicos históricos y las previsiones de las condiciones climáticas en muchas partes del mundo, indican un cambio climático en las últimas décadas, con una tendencia ascendente de la temperatura en el futuro. Las alteraciones climáticas afectarán seriamente los recursos hídricos; las aguas superficiales, las aguas subterráneas y las construcciones relacionadas con ella sufrirán consecuencias no deseadas (Khalilian & Shahvari, 2019; Quansah et al., 2021).

A nivel mundial, el informe más reciente del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) señala que los eventos climáticos extremos están en aumento, provocando cambios drásticos en los patrones de precipitación y afectando la distribución del agua superficial. Este fenómeno no solo intensifica la frecuencia de sequías, sino que también contribuye a inundaciones devastadoras, impactando negativamente en la disponibilidad y distribución del recurso hídrico (IPCC, 2023).

En una escala más regional, América Latina no escapa a los efectos del cambio climático. Un informe de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) destaca el aumento de eventos climáticos extremos en la región, incluyendo sequías prolongadas que afectan la disponibilidad de agua superficial en cuencas críticas (CEPAL, 2023).

La problemática del impacto del cambio climático en la disponibilidad de agua superficial es un desafío apremiante que afecta a nivel global, lo que conlleva a tomar acciones inmediatas y realizar proyecciones a futuro sobre el impacto que tendrá el aumento de la temperatura global en la disponibilidad hídrica futura, con el fin elaborar planes de gestión de recursos hídricos a largo plazo que permitan un aprovechamiento eficaz y sostenible del recurso hídrico a lo largo del tiempo (Iranmanesh et al., 2021; Saade et al., 2021).

Para realizar proyecciones a futuro, actualmente, existen métodos basados principalmente en modelos

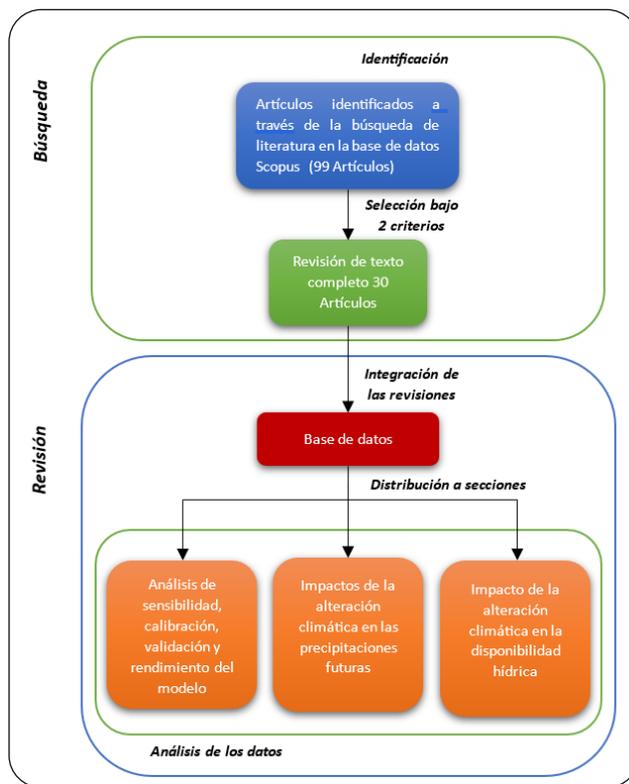
hidrológicos, que permiten evaluar la influencia del cambio climático en los recursos hídricos (Nilawar & Waikar, 2019). La modelización hidrológica en combinación con escenarios de cambio climático permite evaluar los impactos potenciales del aumento de la temperatura en los recursos hídricos (Näschen et al., 2019). El modelo SWAT (Herramienta para Evaluación de Suelos y Agua) y otros modelos hidrológicos son eficaces para representar procesos y elementos físicos relacionados con el agua, a diferencia de los modelos tradicionales que a menudo no pueden abordar los desafíos actuales de gestión del agua. (Touseef et al., 2021).

A nivel mundial, existen estudios que han empleado el modelo semidistribuido SWAT y que reflejan el impacto del cambio climático en la disponibilidad hídrica. El objetivo de la investigación fue realizar una revisión sistemática de artículos indexados desde el año 2014 al 2024, referidos al desempeño del modelo SWAT en la disponibilidad hídrica futura. Para lograr este objetivo se realizó lo siguiente: 1) Explorar cuál fue el desempeño del modelo SWAT en los artículos revisados; 2) Identificar cual fue el impacto del cambio climático en las precipitaciones y la disponibilidad.

Materiales y métodos

Para la revisión sistemática de la literatura, se establecieron 2 etapas principales: la primera correspondió a la búsqueda de la información y la segunda, a la revisión de los artículos encontrados, como se muestra en el siguiente diagrama de flujo.

Figura 1
Flujograma de la metodología



Nota. Adaptado de *Modeling Water Regulation Ecosystem Services: A review in the context of ecosystem accounting* (Nedkov et al., 2022).

Búsqueda de literatura

En esta etapa, se realizó una revisión sistemática de publicaciones disponibles con información relevante y de calidad (Siddaway et al., 2019). La búsqueda de la información incluyó únicamente artículos publicados desde el año 2014 a 2024 en la base de datos Scopus.

Primero se identificaron todos los términos o palabras clave relacionados al tema de modelamiento de la disponibilidad hídrica y el cambio climático. El procedimiento empleado para la búsqueda de la información se realizó en base a estudios previos, como los de Aloui et al., 2023 y Tan et al., 2020, 2021. Para

[Revisión de literatura para el análisis del desempeño del modelo SWAT en la disponibilidad hídrica futura]

optimizar la pesquisa se realizó la siguiente cadena de búsqueda mediante operadores booleanos y aplicado a la opción de *título de artículo*: (“water resources availability” OR “water availability” OR “water” OR “runoff” OR “water balance”) AND (“climate change” OR “climate model” OR “climate change scenarios” OR “climate change impacts” OR “climate change effects”) AND (basin OR sub-basin OR watershed) AND NOT (cover OR landuse OR land OR use OR human OR activities OR urbanization OR crop OR erosion OR management OR green OR blue OR yield OR dam OR soil OR conservation OR quality OR sediments). Además, para filtrar artículos que solo emplean la metodología SWAT y descartar otras metodologías, se agregó la cadena de búsqueda adicional enlazada a la anterior mediante AND y aplicado a la opción *de título de artículo, resumen y palabras clave*: SWAT AND NOT (weap OR “Water Evaluation And Planning System”). Estas cadenas de búsqueda se ingresaron a la base de datos de Scopus y se obtuvo como resultado un total de 99 artículos científicos indexados.

Como segundo paso se procedió a verificar el cumplimiento de los siguientes criterios: a) artículos que contenían el modelo SWAT para determinar disponibilidad hídrica y b) artículos que estén enfocados en la incidencia del cambio climático. Aquellos que cumplieron con ambos criterios fueron seleccionados para su respectivo análisis. Por otro lado, se descartaron los siguientes: aquellos que aplicaban otros modelos que no fuera exclusivamente SWAT, los que no contenían exclusivamente la variable de incidencia de cambio climático y los duplicados, quedando como resultado final un total de 30 de los 99 identificados inicialmente.

Proceso de revisión

Plantilla de la revisión

Para organizar la información en una base de datos adecuada, se empleó la ayuda de MS Excel, ordenando los artículos de acuerdo al año de su publicación, desde el más actual hasta años anteriores

y se ingresaron columnas que contenían la información de título, autores, fuente y el identificador de objetos digitales DOI.

Pasos para la revisión

Una vez caracterizados los artículos por la información de la plantilla, se realizó lo siguiente: 1) Se revisó cada uno de los artículos para obtener los estadísticos empleados en la calibración y la validación del modelo, 2) Se identificaron los años de proyección a futuro empleados en cada estudio, 3) Se identificó las conclusiones principales referentes a la tendencia de las precipitaciones y la disponibilidad hídrica con efectos del cambio climático.

Análisis de los datos

Modelo hidrológico SWAT

El estudio principalmente se basó en la revisión de literatura que emplea el modelo hidrológico semidistribuido SWAT, integrado con ArcGIS, debido a su eficacia en simular procesos agrícolas y forestales, destacando su reconocimiento internacional como herramienta confiable para modelar cuencas multipropósito. Este modelo facilita la toma de decisiones y la gestión de cuencas al considerar diversos procesos ambientales. Es preferido en lugares con escasez de datos por su capacidad para generar datos climáticos durante la simulación (Assfaw et al., 2023).

Calibración y validación del modelo

Cada uno de los artículos revisados presentaron la fase de calibración y validación del modelo, etapas esenciales para su desarrollo, garantizando la representación precisa de los procesos simulados. La calibración ajusta parámetros y datos para mejorar la precisión de las predicciones, mientras que la validación evalúa el rendimiento del modelo con datos no utilizados durante la calibración. Este proceso ayuda a determinar

la precisión y confiabilidad del modelo en diversas condiciones, identificando posibles sesgos o errores (Karam et al., 2023).

Para la calibración, validación, verificación, solidez y fortaleza del modelo SWAT, es vital evaluar sus resultados simulados frente a observaciones reales empleando algunas métricas conocidas. Por lo tanto, se procuró que la literatura revisada en su mayoría presente las siguientes pruebas estadísticas: NSE (Eficiencia de Nash-Sutcliffe), R^2 (Coeficiente de Determinación), PBias (Porcentaje de sesgo) y RSR (Raíz del Error Cuadrático Medio Normalizado) con el objetivo de verificar el rendimiento del modelo (Akhtar et al., 2021).

De cada una de las revistas, se extrajeron los valores de las pruebas estadísticas. Su rendimiento fue calificado según el siguiente cuadro:

Tabla 1
Indicadores estadísticos para la evaluación del desempeño del modelo

Clasificación de Rendimiento	NSE	R^2	PBIAS (%)	RSR
Muy bueno	$0,75 < NSE \leq 1$	$0,75 < R^2 \leq 1$	$-10 < PBIAS < 10$	$0 \leq RSR \leq 0,5$
Bueno	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$0,65 < R^2 \leq 0,75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$0,5 < RSR \leq 0,6$
Satisfactorio	$0,5 < NSE \leq 0,65$	$0,5 < R^2 \leq 0,65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	$0,6 < RSR \leq 0,7$
Insatisfactorio	$NSE \leq 0,5$	$R^2 \leq 0,5$	$PBIAS \geq 25$	$RSR > 0,7$

Nota. Tomado de *Evaluating Future Streamflow Patterns under SSP245 Scenarios: Insights from CMIP6* (Haleem et al., 2023).

Impacto del cambio climático en las precipitaciones y la disponibilidad hídrica

En la revisión de la literatura, se compiló los resultados más resaltantes referidos a la tendencia tanto positiva o negativa de las precipitaciones y la disponibilidad hídrica obtenidas como resultado de aplicación del modelo en las diferentes cuencas y subcuencas estudiadas en los artículos. En base a esa información, se clasificaron y se realizaron gráficos para su respectiva interpretación y verificación de la tendencia en general.

Desarrollo y discusión

Características generales de la literatura

A continuación, se muestra la literatura seleccionada en este estudio, de acuerdo a lo planteado en el capítulo anterior, la cual fue revisada minuciosamente para su respectivo análisis mediante el procedimiento antes mencionado. Se trata de 30 artículos indexados en la base de datos de Scopus. El periodo de publicación fue desde 2014 a 2024, pero se encontró finalmente artículos desde 2016 a 2024 (Tabla 2).

[Revisión de literatura para el análisis del desempeño del modelo SWAT en la disponibilidad hídrica futura]

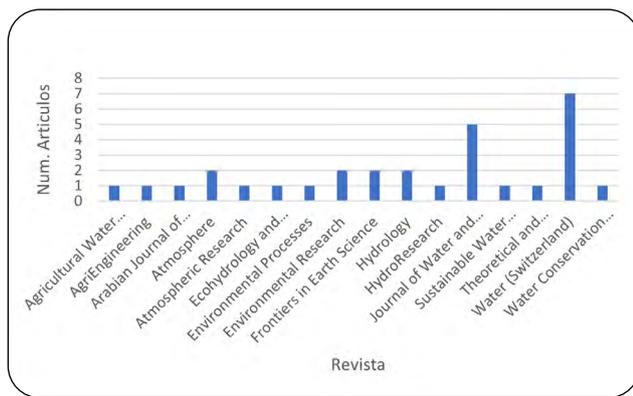
Tabla 2*Listado de literatura seleccionada*

Referencia	Revista	País
Al-Falahi et al. (2024)	Theoretical and Applied Climatology	Yemen
Alawi & Özkul (2023)	Journal of Water and Climate Change	Afganistán
Nath Prajapati et al. (2023)	HydroResearch	Nepal
Deng et al. (2023)	Frontiers in Earth Science	China
Balcha et al. (2023)	Journal of Water and Climate Change	Etiopía
Abesh et al. (2022)	Water (Switzerland)	EE. UU
Ich et al. (2022)	Journal of Water and Climate Change	Camboya
Merga et al. (2022)	Atmosphere	Etiopía
Ougahi et al. (2022)	Journal of Water and Climate Change	India
Fu et al. (2022)	Frontiers in Earth Science	China
Pulighe et al. (2021)	Hydrology	Italia
Saade et al. (2021)	Hydrology	Líbano
Grusson et al. (2021)	Agricultural Water Management	Suecia
Budhathoki et al. (2021)	Ecohydrology and Hydrobiology	Nepal
Haider et al. (2020)	Atmosphere	Pakistán
Okwala et al. (2020)	Environmental Research	Tailandia
Dahal et al. (2020)	Environmental Research	Nepal
Boru et al. (2019)	Sustainable Water Resources Management	Etiopía
Blanco-Gómez et al. (2019)	Water (Switzerland)	El Salvador
Khalilian & Shahvari (2019)	AgriEngineering	Irán
Fentaw et al. (2018)	Water Conservation Science and Engineering	Etiopía
Zaman et al. (2018)	Water (Switzerland)	China
Yu et al. (2018)	Arabian Journal of Geosciences	China
Mishra et al. (2018)	Water (Switzerland)	Nepal
Huyen et al. (2017)	Journal of Water and Climate Change	Vietnam
Chattopadhyay et al. (2017)	Environmental Processes	EE. UU
Luo et al. (2017)	Water (Switzerland)	China
Tan et al. (2017)	Atmospheric Research	Malasia
Yin et al. (2016)	Water (Switzerland)	China
Li et al. (2016)	Water (Switzerland)	China

Nota. La tabla muestra los resultados de la fase de búsqueda y selección de artículos. Se encontraron 99 inicialmente, pero solo fueron seleccionados 30.

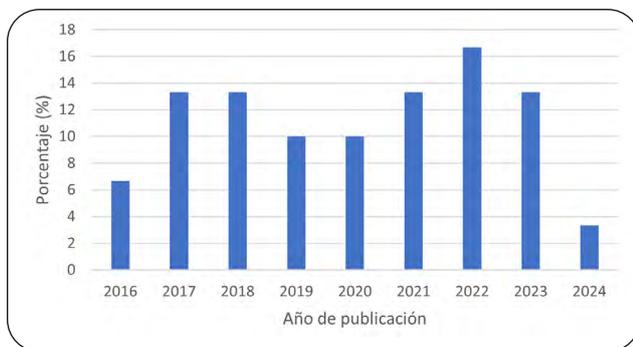
Con respecto a la cantidad de publicaciones que se han hecho sobre el modelamiento de disponibilidad hídrica futura mediante SWAT, se puede apreciar (Figura 2) que las revistas *Journal of Water and Climate Change* y *Water (Switzerland)* han sido las que poseen mayor cantidad de publicaciones respecto al tema, con 5 y 7 artículos.

Figura 2
Distribución de los artículos por año de publicación



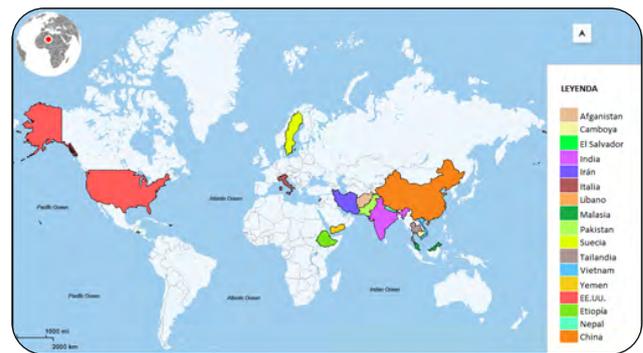
Con respecto al año de publicación, los artículos referidos al modelamiento de disponibilidad hídrica futura mediante SWAT y que fueron revisados en este estudio, muestran que el 43.33% fueron publicados entre los años 2021, 2022 y 2023. El porcentaje restante se distribuye en los años 2016 al 2020 y 2024, resaltando que la mayor cantidad de artículos que se publicaron corresponden al año 2022 (Figura 3).

Figura 3
Distribución de los artículos por año de publicación



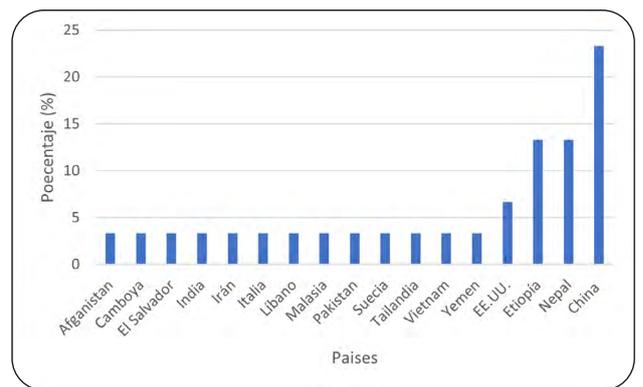
Especialmente, los artículos referidos modelamiento de disponibilidad hídrica futura mediante SWAT y que fueron revisados en este estudio, se publicaron en su mayoría en la República de China (23%), seguido de Etiopía y Nepal (13%). (figuras 4 y 5).

Figura 4
Distribución de los artículos por año de publicación



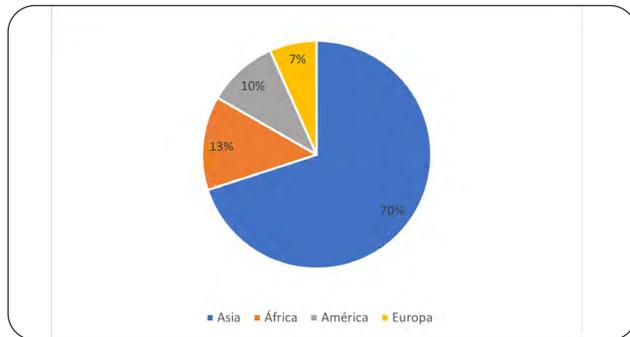
Nota. La figura muestra la distribución de los artículos revisados según el país donde pertenece su área de estudio.

Figura 5
Distribución espacial de los artículos - países



El 70% de los estudios revisados se encuentran en Asia, el 13% en África, el 10% en América y el 7% en Europa (Figura 6).

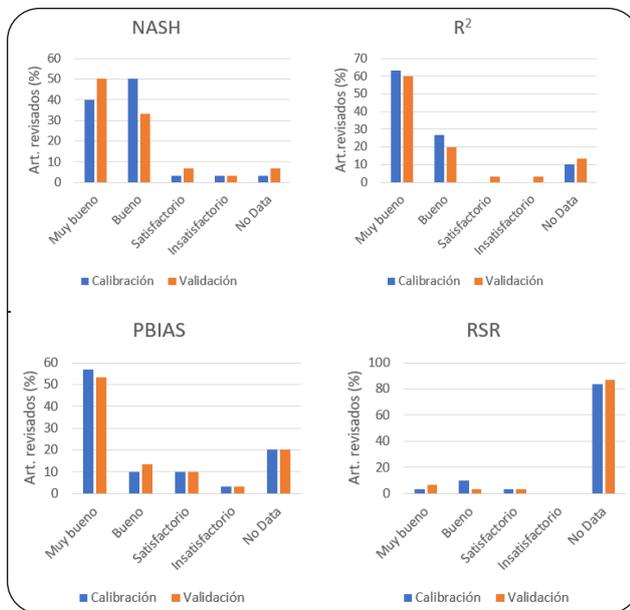
[Revisión de literatura para el análisis del desempeño del modelo SWAT en la disponibilidad hídrica futura]

Figura 6*Distribución espacial de los artículos por continentes*

Nota. La figura muestra que la mayor cantidad de estudios fueron realizados en el continente asiático.

Calibración y validación del modelo

Durante la calibración, el modelo SWAT tuvo un buen desempeño en la mayoría de los artículos revisados. Se evidenció que el 90% de los artículos

Figura 7*Pruebas estadísticas en la calibración y validación*

Nota. La figura muestra la calificación de los estadísticos para la calibración y validación de los modelos en los artículos revisados.

revisados obtuvieron un NSE catalogado entre Bueno a Muy bueno, el 90% de los artículos un R² catalogado entre Bueno a Muy bueno, el 67% de los artículos un PBIAS calificado entre Bueno y Muy Bueno a diferencia de que solo un 13% de los artículos obtuvieron un RSR catalogado entre Bueno y Muy bueno, debido a que el 83% de los estudios no consideraron este estadístico, ya que si lo hubieran hecho, es muy probable que los resultados hubieran sido favorables.

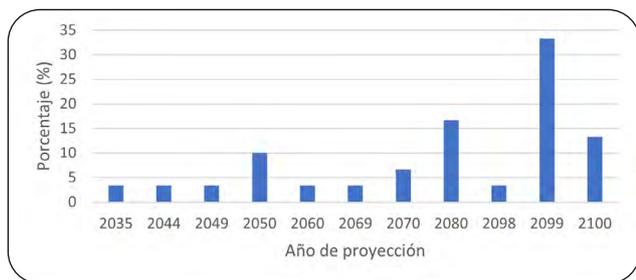
Durante la validación, el modelo SWAT tuvo un buen desempeño en la mayoría de los artículos revisados. Se evidenció que el 83% de los artículos revisados obtuvo un NSE catalogado entre Bueno a Muy bueno, el 80% de los artículos un R² catalogado entre Bueno a Muy bueno, el 66% de los artículos un PBIAS calificado entre Bueno y Muy bueno a diferencia de que solo un 10% de los artículos obtuvo un RSR catalogado entre Bueno y Muy bueno debido a que el 87% de los estudios no consideraron este estadístico, ya que, si lo hubieran hecho, es muy probable que los resultados hubieran sido favorables (Figura 7).

Impacto de cambio climático en las precipitaciones y la disponibilidad hídrica futura

En cuanto a los años de proyección empleados en los estudios revisados, aproximadamente el 33% de los estudios realizaron proyecciones al año 2099, el 16% al año 2080 y 13% al 2100. La mayoría de los estudios proyectaron sus modelos entre los años 2080 al 2100 (Figura 8).

Figura 8

Distribución de los artículos según proyección a futuro

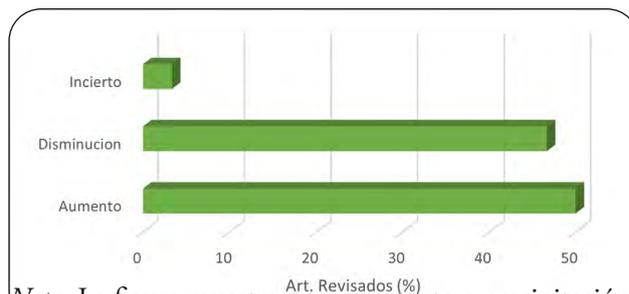


Nota. La figura muestra que la mayoría de los modelos se proyectaron al año 2099.

En cuanto a las tendencias de proyecciones en la precipitación y la disponibilidad hídrica futura, se obtuvo que, con respecto a la precipitación, el 50% de los estudios determinó que en el futuro se presentará un aumento de las precipitaciones, el 46.67% determinó que en el futuro se presentará una disminución de las precipitaciones y solo un 3.33% determinó un futuro en el que es incierto determinar un aumento o disminución, necesitando mayores estudios. Por último, con respecto a la disponibilidad hídrica, el 33.33% de los estudios determinó que en el futuro se presentará un aumento en la disponibilidad hídrica, el 66.3% indicó que en el futuro se presentará una disminución en la disponibilidad hídrica y solo un 3.33% concluyó un futuro en el que es incierto determinar un aumento o disminución, pues se necesitan mayores estudios (figuras 9 y 10).

Figura 9

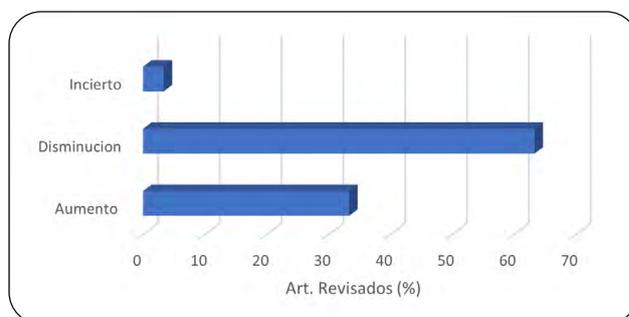
Tendencia de la precipitación a futuro



Nota. La figura muestra que, en cuanto a precipitación, existe una tendencia tanto al aumento y disminución.

Figura 10

Tendencia de la disponibilidad hídrica a futuro



Nota. La figura muestra que, en cuanto a la disponibilidad hídrica, existe una tendencia mayoritaria a la disminución del recurso hídrico.

Discusión

En la calibración y validación del modelo, en esta revisión de 30 artículos indexados se verificó que la mayoría de los resultados obtuvieron un desempeño entre *bueno* y *muy bueno* a diferencia del estudio realizado por Tan et al. (2020) quien comparó 111 artículos indexados que en su mayoría obtuvieron un desempeño *satisfactorio*, que en realidad no se aleja mucho a lo encontrado en este estudio. Por ello, se puede decir que, en ambos casos, se obtuvieron resultados por encima del mínimo requerido, lo cual evidencia una buena representación del modelo SWAT con respecto a los procesos hidrológicos. Otros estudios realizados como los de (Aloui et al., 2023; Tan et al., 2021), también

muestran el buen desempeño del modelo, reforzando nuestros resultados.

Con respecto a la tendencia de resultados en cuanto a las precipitaciones y disponibilidad hídrica futuras, en esta revisión se encontró una tendencia significativa a la disminución progresiva de ambos, al igual que en el estudio realizado por Marin et al. (2020) quien resalta una afectación a los procesos hidrológicos ocasionada por una tendencia a la disminución. Por eso recomienda emplear el modelo como una herramienta de gestión para adoptar medidas sostenibles y mitigar los efectos del cambio climático con la finalidad de mejorar la resiliencia de las poblaciones, lo mismo que se enfatiza en este estudio.

Conclusiones

Esta revisión, en cuanto a la validez del modelo empleado en los diferentes estudios analizados, evidenció que el modelo SWAT tiene muy buena aplicabilidad en diferentes cuencas a nivel mundial. Se destaca que presentó un buen desempeño y confiabilidad, demostrando ser una herramienta valiosa para investigaciones hidroclimáticas futuras.

En cuanto a la tendencia de precipitaciones futuras, existe una tendencia a la disminución progresiva de estas, por lo que es importante tomar medidas inmediatas con la finalidad de mitigar los efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico. Se espera sequías prolongadas y en algunos casos inundaciones.

En cuanto a la tendencia de la disponibilidad hídrica, esta disminuirá progresivamente en el futuro, llegando a ser un problema, agravado por el incremento demográfico. Por lo tanto, se recomienda tomar acciones inmediatas asegurando y promoviendo el uso sostenible de los recursos hídricos.

Referencias

- Abesh, B. F., Jin, L., & Hubbart, J. A. (2022). Predicting Climate Change Impacts on Water Balance Components of a Mountainous Watershed in the Northeastern USA. *Water (Switzerland)*, 14(20). DOI: <https://doi.org/10.3390/w14203349>
- Akhtar, F., Awan, U. K., Borgemeister, C., & Tischbein, B. (2021). Coupling remote sensing and hydrological model for evaluating the impacts of climate change on streamflow in data-scarce environment. *Sustainability (Switzerland)*, 13(24). DOI: <https://doi.org/10.3390/su132414025>
- Alawi, S. A., & Özkul, S. (2023). Impact assessment of climate change on water resources of the Kokcha watershed: a sub-basin of the Amu Darya river basin in Afghanistan. *Journal of Water and Climate Change*, 14(5). DOI: <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.504>
- Al-Falahi, A. H., Saddique, · Naeem, Spank, · Uwe, Pluntke, · Thomas, Gebrechorkos, S. H., Mauder, M., & Bernhofer, · Christian. (2024). Hydrological investigation of climate change impact on water balance components in the agricultural terraced watersheds of Yemeni highland. *Theoretical and Applied Climatology*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-024-04913-x>
- Aloui, S., Mazzoni, A., Elomri, A., Aouissi, J., Boufekane, A., & Zghibi, A. (2023). A review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) studies of Mediterranean catchments: Applications, feasibility, and future directions. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 326). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116799>

- Assfaw, M. T., Neka, B. G., & Ayele, E. G. (2023). Modeling the impact of climate change on streamflow responses in the Kessew watershed, Middle Awash sub-basin, Ethiopia. *Journal of Water and Climate Change*, *14*(12), 4837–4859. DOI: <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.541>
- Balcha, S. K., Awass, A. A., Hulluka, T. A., Bantider, A., & Ayele, G. T. (2023). Assessment of future climate change impact on water balance components in Central Rift Valley Lakes Basin, Ethiopia. *Journal of Water and Climate Change*, *14*(1). DOI: <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.249>
- Blanco-Gómez, P., Jimeno-Sáez, P., Senent-Aparicio, J., & Pérez-Sánchez, J. (2019). Impact of climate change on water balance components and droughts in the Guajoyo River Basin (El Salvador). *Water (Switzerland)*, *11*(11). DOI: <https://doi.org/10.3390/w11112360>
- Boru, G. F., Gonfa, Z. B., & Diga, G. M. (2019). Impacts of climate change on stream flow and water availability in Anger sub-basin, Nile Basin of Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management*, *5*(4). DOI: <https://doi.org/10.1007/s40899-019-00327-0>
- Budhathoki, A., Babel, M. S., Shrestha, S., Meon, G., & Kamalamma, A. G. (2021). Climate change impact on water balance and hydrological extremes in different physiographic regions of the West Seti River Basin, Nepal. *Ecology and Hydrobiology*, *21*(1). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2020.07.001>
- CEPAL. (2023). *Statistical Yearbook for Latin America and The Caribbean 2023*. www.issuu.com/publicacionescepal/stacks
- Chattopadhyay, S., Edwards, D. R., Yu, Y., & Hamidisepehr, A. (2017). An Assessment of Climate Change Impacts on Future Water Availability and Droughts in the Kentucky River Basin. *Environmental Processes*, *4*(3). DOI: <https://doi.org/10.1007/s40710-017-0259-2>
- Dahal, P., Shrestha, M. L., Panthi, J., & Pradhananga, D. (2020). Modeling the future impacts of climate change on water availability in the Karnali River Basin of Nepal Himalaya. *Environmental Research*, *185*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109430>
- Deng, Y., Yao, Y., Zhao, Y., Luo, D., Cao, B., Kuang, X., & Zheng, C. (2023). Impact of climate change on the long-term water balance in the Yarlung Zangbo basin. *Frontiers in Earth Science*, *11*. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1107809>
- Fentaw, F., Hailu, D., Nigussie, A., & Melesse, A. M. (2018). Climate Change Impact on the Hydrology of Tekeze Basin, Ethiopia: Projection of Rainfall-Runoff for Future Water Resources Planning. *Water Conservation Science and Engineering*, *3*(4). DOI: <https://doi.org/10.1007/s41101-018-0057-3>
- Fu, Z., Xie, Y., Zhang, Y., Jiang, X., Guo, H., & Wang, S. (2022). Water Resource Availability Assessment Through Hydrological Simulation Under Climate Change in the Huangshui Watershed of the Qinghai-Tibet Plateau. *Frontiers in Earth Science*, *9*. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2021.755119>
- Grusson, Y., Wesström, I., Svedberg, E., & Joel, A. (2021). Influence of climate change on water partitioning in agricultural watersheds: Examples from Sweden. *Agricultural Water Management*, *249*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106766>

- Haider, H., Zaman, M., Liu, S., Saifullah, M., Usman, M., Chauhdary, J. N., Anjum, M. N., & Waseem, M. (2020). Appraisal of climate change and its impact on water resources of Pakistan: A case study of mangla watershed. *Atmosphere*, *11*(10). DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos11101071>
- Haleem, K., Khan, A. U., Khan, J., Ghanim, A. A. J., & Al-Areeq, A. M. (2023). Evaluating Future Streamflow Patterns under SSP245 Scenarios: Insights from CMIP6. *Sustainability*, *15*(22), 16117. DOI: <https://doi.org/10.3390/su152216117>
- Huyen, N. T., Tu, L. H., Tram, V. N. Q., Minh, D. N., Liem, N. D., & Loi, N. K. (2017). Assessing the impacts of climate change on water resources in the Srepok watershed, central highland of Vietnam. *Journal of Water and Climate Change*, *8*(3). DOI: <https://doi.org/10.2166/wcc.2017.135>
- Ich, I., Sok, T., Kaing, V., Try, S., Chan, R., & Oeurng, C. (2022). Climate change impact on water balance and hydrological extremes in the Lower Mekong Basin: a case study of Prek Thnot River Basin, Cambodia. *Journal of Water and Climate Change*, *13*(8). DOI: <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.051>
- IPCC. (2023). Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Technical Summary. In *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009325844.002>
- Iranmanesh, R., Jalalkamali, N., & Tayari, O. (2021). Water resources availability under different climate change scenarios in South East Iran. *Journal of Water and Climate Change*, *12*(8). DOI: <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.373>
- Karam, S., Zango, B. S., Seidou, O., Perera, D., Nagabhatla, N., & Tshimanga, R. M. (2023). Impacts of Climate Change on Hydrological Regimes in the Congo River Basin. *Sustainability (Switzerland)*, *15*(7). DOI: <https://doi.org/10.3390/su15076066>
- Khalilian, S., & Shahvari, N. (2019). A SWAT Evaluation of the Effects of Climate Change on Renewable Water Resources in Salt Lake Sub-Basin, Iran. *AgriEngineering*, *1*(1). DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering1010004>
- Li, F., Zhang, G., & Xu, Y. J. (2016). Assessing climate change impacts on water resources in the Songhua River Basin. *Water (Switzerland)*, *8*(10). DOI: <https://doi.org/10.3390/w8100420>
- Luo, M., Meng, F., Liu, T., Duan, Y., Frankl, A., Kurban, A., & de Maeyer, P. (2017). Multi-model ensemble approaches to assessment of effects of local climate change on water resources of the Hotan River basin in Xinjiang, China. *Water (Switzerland)*, *9*(8). DOI: <https://doi.org/10.3390/w9080584>
- Marin, M., Clinciu, I., Tudose, N. C., Ungurean, C., Adorjani, A., Mihalache, A. L., Davidescu, A. A., Davidescu, O., Dinca, L., & Cacovean, H. (2020). *Assessing the vulnerability of water resources in the context of climate changes in a small forested watershed using SWAT: A review*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109330>
- Merga, D. D., Adeba, D., Regasa, M. S., & Leta, M. K. (2022). Evaluation of Surface Water Resource Availability under the Impact of Climate Change in the Dhidhessa Sub-Basin, Ethiopia. *Atmosphere*, *13*(8). DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos13081296>

- Mishra, Y., Nakamura, T., Babel, M. S., Ninsawat, S., & Ochi, S. (2018). Impact of climate change on water resources of the Bheri River Basin, Nepal. *Water (Switzerland)*, 10(2). DOI: <https://doi.org/10.3390/w10020220>
- Näschen, K., Dieckkrüger, B., Leemhuis, C., Seregina, L. S., & van der Linden, R. (2019). Impact of climate change on water resources in the Kilombero Catchment in Tanzania. *Water (Switzerland)*, 11(4). DOI: <https://doi.org/10.3390/w11040859>
- Nath Prajapati, R., Ibrahim, N., & Thapa, R. (2023). *Climate change impact on water availability in the Himalaya: Insights from Sunkoshi River basin, Nepal*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2023.10.002>
- Nedkov, S., Campagne, S., Borisova, B., Krpec, P., Prodanova, H., Kokkoris, I. P., Hristova, D., Le Clec'h G, S., Santos-Martin, F., Burkhard, B., Bekri, E. S., Stoycheva, V., Bruzón, A. G., & Dimopoulos, P. (2022). Modeling water regulation ecosystem services: A review in the context of ecosystem accounting. *Ecosystem Services*, 56, 101458. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101458>
- Nilawar, A. P., & Waikar, M. L. (2019). Impacts of climate change on streamflow and sediment concentration under RCP 4.5 and 8.5: A case study in Purna river basin, India. *Science of the Total Environment*, 650. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.334>
- Okwala, T., Shrestha, S., Ghimire, S., Mohanasundaram, S., & Datta, A. (2020). Assessment of climate change impacts on water balance and hydrological extremes in Bang Pakong-Prachin Buri river basin, Thailand. *Environmental Research*, 186. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109544>
- Ougahi, J. H., Cutler, M. E. J., & Cook, S. J. (2022). Modelling climate change impact on water resources of the Upper Indus Basin. *Journal of Water and Climate Change*, 13(2). DOI: <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.233>
- Pulighe, G., Lupia, F., Chen, H., & Yin, H. (2021). Modeling climate change impacts on water balance of a mediterranean watershed using swat+. *Hydrology*, 8(4). DOI: <https://doi.org/10.3390/hydrology8040157>
- Quansah, J. E., Naliaka, A. B., Fall, S., Ankumah, R., & Afandi, G. El. (2021). Assessing future impacts of climate change on streamflow within the alabama river basin. *Climate*, 9(4). DOI: <https://doi.org/10.3390/cli9040055>
- Reshma, C., & Arunkumar, R. (2023). Assessment of impact of climate change on the streamflow of Idamalayar River Basin, Kerala. *Journal of Water and Climate Change*, 14(7). DOI: <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.456>
- Saade, J., Atieh, M., Ghanimeh, S., & Golmohammadi, G. (2021). Modeling impact of climate change on surface water availability using swat model in a semi-arid basin: Case of el kalb river, lebanon. *Hydrology*, 8(3). DOI: <https://doi.org/10.3390/HYDROLOGY8030134>
- Siddaway, A. P., Wood, A. M., & Hedges, L. V. (2019). How to Do a Systematic Review: A Best Practice Guide for Conducting and Reporting Narrative Reviews, Meta-Analyses, and Meta-Syntheses. In *Annual Review of Psychology* (Vol. 70). DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010418-102803>

- Tan, M. L., Gassman, P. W., Liang, J., & Haywood, J. M. (2021). A review of alternative climate products for SWAT modelling: Sources, assessment and future directions. In *Science of the Total Environment* (Vol. 795). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148915>
- Tan, M. L., Gassman, P. W., Yang, X., & Haywood, J. (2020). A review of SWAT applications, performance and future needs for simulation of hydro-climatic extremes. In *Advances in Water Resources* (Vol. 143). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103662>
- Tan, M. L., Ibrahim, A. L., Yusop, Z., Chua, V. P., & Chan, N. W. (2017). Climate change impacts under CMIP5 RCP scenarios on water resources of the Kelantan River Basin, Malaysia. *Atmospheric Research*, 189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.01.008>
- Touseef, M., Chen, L., & Yang, W. (2021). Assessment of surfacewater availability under climate change using coupled SWAT-WEAP in hongshui river basin, China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(5). DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi10050298>
- Yin, Z., Feng, Q., Zou, S., & Yang, L. (2016). Assessing variation in water balance components in mountainous Inland River Basin experiencing climate change. *Water (Switzerland)*, 8(10). DOI: <https://doi.org/10.3390/w8100472>
- Yu, Y., Liu, J., Yang, Z., Cao, Y., Chang, J., & Mei, C. (2018). Effect of climate change on water resources in the Yuanshui River Basin: a SWAT model assessment. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(11). DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3619-y>
- Zaman, M., Anjum, M. N., Usman, M., Ahmad, I., Saifullah, M., Yuan, S., & Liu, S. (2018). Enumerating the effects of climate change on water resources using GCM scenarios at the Xin'anjiang Watershed, China. *Water (Switzerland)*, 10(10). DOI: <https://doi.org/10.3390/w10101296>

Biodiseño de Materiales de Construcción Sostenibles

Resumen

Diego Jesus Aranda

Ingeniero Civil PMI-ACP, PMP especializado en Gerencia de Proyectos con mas de 12 años de experiencia en desarrollo y ejecución de proyectos en la industria Minera, Energía y Construcción. Con amplio dominio en el desarrollo de proyectos EPC, EPCM en Proyectos de Gran Minería y Energía: En las áreas de Gestión de Proyectos, Geotecnia, Hidráulica, Estructuras y Procesos Constructivos.

<https://orcid.org/0000-0002-3333-5435>
rjesusa@unasam.edu.pe

Las incidencias negativas que generan las construcciones en el entorno natural han obligado a que el sector constructivo adopte nuevas prácticas sustentables para hacer frente dicha problemática. De ahí surge la necesidad de buscar alternativas de biodiseño de materiales claves para cambiar las prácticas convencionales por unas más sustentables. Bajo ese sentido, la relevancia de este estudio recae en el objetivo primordial de analizar los casos de biodiseños de materiales para la construcción como estrategia de sustentabilidad; para lo cual, se abordó un estudio cualitativo y de alcance exploratorio, en el que se examinó una serie de casos de biodiseños por medio de un análisis documental en el contexto internacional y nacional. Los resultados evidenciaron una serie de biodiseños provenientes de fuentes renovables que resultan ser viables y muy efectivos para la construcción, pues ofrecen no solo propiedades físicas y mecánicas adecuadas, sino medios cruciales para hacer frente a la contaminación de la industria de ladrillos, mitigar los daños hacia el ambiente, minimizar la generación de residuos y promover el reciclaje de plásticos. En conclusión, el análisis de biodiseños para construcción reveló hallazgos importantes a nivel internacional y nacional. A nivel global, se encontraron opciones prometedoras con un enfoque amplio en temas específicos. A nivel nacional, aunque hay escasez de investigaciones, se identificaron avances significativos. Se recomienda enfocarse en desarrollar nuevos materiales sostenibles y realizar estudios a largo plazo para evaluar su impacto ambiental.

Palabras clave: Biodiseño, Sustentabilidad, Construcción, Materiales.

Cómo citar este artículo: Jesus Aranda, D. (2024). Biodiseño de Materiales de Construcción Sostenibles. *Aporte Santiaguino*, 17(2), Pág. 273–291. <https://doi.org/10.32911/as.2024.v17.n2.1183>

Recibido: 2024-09-20 | **Aceptado:** 2024-11-20



Biodesign of Sustainable Construction Materials

The negative incidents generated by constructions in the natural environment have forced the construction sector to adopt new sustainable practices to address this problem, hence the need to look for biodesign alternatives for key materials to change conventional practices for more sustainable ones. In this sense, the relevance of this study lies in the primary objective of analyzing the cases of biodesign of materials for construction as a sustainability strategy; For this purpose, a qualitative and exploratory study was undertaken, in which a series of biodesign cases were examined through a documentary analysis in the international and national context. The results found evidenced a series of biodesigns from renewable sources that turned out to be viable and very effective for construction, by offering not only adequate physical and mechanical properties, but also crucial means to address pollution from the brick industry, mitigate damage to the environment, minimize waste generation and promote plastic recycling. In conclusion, the analysis of biodesigns for construction revealed important findings at the international and national level. At a global level, promising options were found with a broad focus on specific topics. At the national level, although there is a lack of research, significant advances were identified. It is recommended to focus on developing new sustainable materials and carry out long-term studies to evaluate their environmental impact.

Palabras clave: Biodiseño, Sustentabilidad, Construcción, Materiales

Introducción

Actualmente, el mundo está enfrentando una necesidad urgente de cambiar las prácticas convencionales de construcción por unas más sustentables, dado que la industria constructora ha estado empleando el uso masivo de recursos y generando emisiones de carbono,

por lo que resulta fundamental el desarrollo de un camino hacia la sustentabilidad (Goidea et al. 2022). Aunado a ello, las construcciones están hechas para durar mucho tiempo; sin embargo, tienden a impactar en varias escalas del contexto urbano, como del entorno natural, ya que las áreas urbanas son responsables de hasta el 70% de emisiones de carbono a nivel mundial, situación que se agrava con el paso del tiempo. Asimismo, estudios recientes han afirmado que se espera que, para el año 2030 la población mundial habite en ciudades hasta en un 60% (Yuan et al., 2021). En consecuencia, la preocupación del impacto ambiental de las edificaciones derivada de la producción de materiales de construcción y la generación de residuos, lo convierten en el mayor sector consumidor de energía y emisor de gases de efecto invernadero. Dicho aspecto se refleja en que la mayoría de los materiales constructivos modernos suelen producirse por medio de procesos que dependen en gran medida de recursos no renovables que generan una gran cantidad de desechos, lo que conlleva a la creación de entornos insalubres (Pearlmutter et al., 2020). Es así como las construcciones se han transformado en un grave problema a nivel ambiental producto de su alta exigencia de recursos naturales como de una producción sumamente masiva de desechos de gran volumen, que ameritan de un manejo especial para su transformación e incluso transporte donde, aproximadamente la mitad de los materiales extraídos de la tierra se destinan a la construcción, lo que resulta en una gran cantidad de residuos que constituyen aproximadamente el 50% de todos los desechos humanos. Esta situación no solo afecta al medio ambiente y al ecosistema, sino también a la salud de las personas (Hernández-Zamora et al, 2021).

Por su parte, la investigación se justifica ante la necesidad de buscar alternativas de solución para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero emitidos por las construcciones, así como la contaminación ambiental y el consumo de recursos asociados a ellas; todo ello, con la finalidad de que exista un crecimiento biológico en la fabricación de nuevas clases de materiales

y sean claves para reemplazar la extracción de minerales y la producción centralizada bajo el uso intensivo de energía, que direccionen a nuevos desafíos en el rubro de la construcción. Teniendo como precedente lo mencionado anteriormente, se plantea la siguiente pregunta de investigación ¿Qué características poseen los biodiseños de materiales para la construcción empleados como estrategias de sustentabilidad? En ese sentido, resulta imperativo la necesidad de cambiar las prácticas convencionales de construcción por enfoques más sustentables; siendo que, la industria de la construcción es responsable del uso masivo de recursos y emisiones de carbono, donde debe adaptarse hacia la sustentabilidad, especialmente ante el crecimiento continuo de las áreas urbanas y el impacto ambiental. La investigación se sustenta en el desarrollo de materiales sostenibles, como los materiales de construcción vivos (LBM) que incorporan cianobacterias capaces de producir biocemento. Estas innovaciones ofrecen nuevas alternativas para mejorar la eficiencia y la ecosostenibilidad en la construcción, contribuyendo así a un desarrollo urbano más equitativo y respetuoso con el medio ambiente. Por ende, el objetivo principal de este estudio es analizar los casos de biodiseños de materiales para la construcción como estrategia de sustentabilidad.

Frente a ello, una serie de aproximaciones teóricas han ahondado que el biodiseño representa una oportunidad para el desarrollo de materiales de construcción con bases biológicas que influyen en la ciencia de los materiales, tales como ladrillos de algas marinas que son capaces de eliminar carbono atmosférico a través de la fotosíntesis de las algas; por tanto, al ser un producto duradero idóneo para retener carbono se constituye como una alternativa biomaterial de construcción que no consume mucha energía y mitiga el cambio climático (Scardifield, 2023). Inclusive, la búsqueda de la sostenibilidad en la fabricación de materiales con organismos vivos como bacterias, hongos y algas se han convertido en un factor crucial para abordar los problemas ambientales. Ante ello surgen respuestas como el diseño de un biocemento formado mediante la precipitación de calcita inducida microbianamente

(MICP) que da como resultado un potencial material sustentable, cuya resistencia a la compresión es del 40% en comparación al hormigón convencional; además, en términos de permeabilidad al agua, compatibilidad con otros materiales y acabados tiende a ser muy eficiente (Lee et al., 2018). Aunado a ello, el desarrollo de materiales de autorreparación biomejorados brindan la oportunidad de mejorar las construcciones, su rendimiento y reducir la frecuencia de aquellos costosos programas de mantenimiento, uno de ellos es la inserción de microbianos de carbono por medio de bacterias encapsuladas y estratificadas en cal que facilita la captura del carbono atmosférico, lo que conlleva a una reducción de regímenes de mantenimiento generadores de carbono; debido a ello, dicha innovación se traduce no solo como una oportunidad de autocuración que ofrece una amplia mejora del rendimiento de materiales sostenibles, sino que compete a una proyección rápida de solución a los problemas de materiales en el futuro (Booth & Jankovic, 2022).

De la misma manera, la fabricación convencional del concreto demanda una gran cantidad de energía, lo que constituye aproximadamente del 5% al 8% de las emisiones anuales de CO₂ a nivel mundial. El biocemento, un material de construcción en uso industrial, presenta la posibilidad de competir con el concreto tradicional como una alternativa más viable y respetuosa con el medio ambiente (Carter et al., 2023). Bajo esa misma perspectiva, los materiales de construcción vivos (LBM) están generando un creciente interés en el ámbito de los materiales de construcción alternativos sostenibles, con el objetivo de reducir el impacto significativo que la industria de la construcción tiene en las emisiones globales de CO₂; a raíz de ello, numerosos estudios se han enfocado en investigar el proceso de bioimpresión tridimensional para desarrollar LBM, los cuales integran la cianobacteria *Synechococcus* sp. cepa 7002. Esta cepa tiene la capacidad de generar carbonato de calcio (CaCO₃), utilizado como biocemento (Reinhardt et al., 2023). Debido a ello, se han propuesto diversas estrategias para reducir estas emisiones, como la captura de CO₂ en

fuentes puntuales, el uso de combustibles renovables, la exploración de cementos alternativos y la incorporación de materiales cementantes complementarios, las tecnologías emergentes de biocemento, basadas en la biomineralización microbiana, tienen el potencial de revolucionar la industria de manera significativa (Beatty et al., 2022).

Materiales y métodos

El tipo de estudio es básico, de alcance exploratorio y diseño no experimental. Dado que el tipo básico se enfoca en dar cimientos para investigaciones de tipo aplicada con el fin de ser aplicados a estos estudios (Ñaupas et al., 2018). De igual forma, el nivel exploratorio tiene el fin de examinar un problema de investigación poco estudiado para obtener información y llevar a cabo un estudio más completo y profundo; asimismo el diseño no experimental, no hay manipulación de variables, solo se observa los fenómenos en su contexto para analizarlos (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

La población es el conjunto de unidades y elementos de un estudio, y la muestra es un subgrupo de esta población (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018). Dicho ello, este estudio tiene como muestra examinar una serie de casos de biodiseño de materiales en el sector de la construcción para comprender mejor su contribución a la sostenibilidad en esta industria. Asimismo, se presenta un análisis documental, cuya técnica de recolección es la revisión sistemática mediante el análisis de diversos contenidos referentes al objetivo del estudio.

El procedimiento parte de la revisión de los diferentes artículos. Se realizó un proceso de búsqueda de manera exhaustiva de literatura científica diversa y se optó el Protocolo Prisma, puesto que está diseñado para realizar revisiones; es así que se documentó de manera transparente usando metodología explícita para identificar, seleccionar y valorar críticamente la investigación con la finalidad de poder servir de referencia a diferentes investigaciones (Page et al., 2021). Todo ello,

con el fin de recopilar, revisar y analizar información y características relacionadas con casos de materiales de biodiseño en el ámbito de la construcción, tanto a nivel nacional como internacional, para finalmente constatar dicha información mediante la discusión entre los estudios a nivel peruano e internacional, y lograr identificar las diferencias significativas entre los materiales de biodiseño y lograr concluir qué materiales son utilizados en la construcción y proporcionar una comprensión más amplia de estos. Esto podría fomentar su uso y aplicación en otros estudios que busquen implementarlos.

La búsqueda de artículos sobre biodiseño de materiales sostenibles y la construcción se realizó mediante la creación de una ecuación de búsqueda aplicada a las bases de datos existentes, considerando artículos científicos desarrollados en los últimos 7 años, publicados en español, inglés y portugués. Las bases de datos fueron; Scielo, PubMed, MDPI, Springer Link, IWA Publishing, NSF-PAR, Latindex, Dialnet, Semantic Scholar, ScienceDirect, Elsevier, Scopus, Alicia y IOPScience, tal como se muestra en la Tabla 1.

La presente recopilación se realizó a través de estrategias a partir de procesos de búsqueda de la literatura. Se hizo una exhaustiva revisión en las bases de datos mencionadas en el acápite anterior, empleando las palabras clave: “biodiseño” “materiales”, “biodesign” “materials”, “biodesign” “materials” “sustainable”, “biodesign of materials” y “biodiseño” “materiales” “construcción”. Además, se utilizaron los operadores booleanos AND y OR para agilizar el proceso de búsqueda y disminuir la cantidad de artículos que emergen sin el uso de operadores de búsqueda. Se usaron las palabras “biodesign of materials” AND “sustainable”. Se realizó filtros tomando en cuenta los 7 años de vigencia, revistas indexadas, documentos completos, idioma para la obtener resultados de artículos más selectivos y centrados en la temática.

Tabla 1
Criterios de búsqueda

N°	Base de datos	Ecuación de búsqueda	Año						
			2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	Scielo	“Biodiseño” “materiales”				1			
2	IOPscience	“biodesign” “materials”						1	
3	Springer Link	“biodesign” “materials” “sustainable”				1		1	1
4	MDPI	“biodesign of materials” AND “sustainable”	1		1	1	2		
5	PubMed	“biodesign of materials”					2	2	
6	I W A Publishing	“biodesign of materials”		1					
7	NSF-PAR	“biodesign of materials”					1		
8	Latindex	“biodiseño” “materiales” “construcción”					1		
9	Dialnet	“biodiseño” “materiales”						1	
10	S e m a n t i c Scholar	“biodesign of materials”	1					1	
11	Elsevier	“biodesign of materials” AND “sustainable”	1					1	
12	Sciendirect	“biodesign of materials” AND “sustainable”			1	2	1		1
13	OUCI	“biodesign of materials”		1					
14	Scopus	“biodesign of materials” AND “sustainable”					1		
15	Alicia	“materiales” “sostenibilidad”			1				
Total			3	2	3	5	8	7	2

[Biodiseño de Materiales de Construcción Sostenibles]

Nota. Detalle de las bases de datos consultadas y ecuaciones de búsqueda.

En total fueron tomados en cuenta 30 artículos que fueron extraídos de las bases de datos antes mencionadas. Por otro lado, para el proceso y criterios de selección de artículos, se tomaron en cuenta 16 artículos, que fueron tomados en cuenta para realizar la discusión a nivel nacional e internacional.

La lista de artículos seleccionados y datos principales permiten evidenciar el análisis de los 16 artículos seleccionados. La Tabla 2 se ha elaborado en base a la información encontrada. Está estructurada según autor, año, revista, título, país y aporte.

Tabla 2

Artículos incluidos en la revisión

Nº	Autores	Tipo de biomaterial	Año	Revista	Aporte	Limitaciones	País
1	X. Xiong, L. Wang, I. K. M. Yu, and D. C. W. Tsang	Biomasa	2020	ScienceDirect	Los materiales de construcción derivados de carbohidratos, como la fibra, el biocarbón y las huminas, muestran promesa debido a su porosidad, resistencia mecánica y estabilidad térmica para el aprovechamiento de residuos.	La absorción de gases de efecto invernadero en las paredes recubiertas de biocarbón puede presentar limitaciones a largo plazo debido a que la saturación ocurre rápidamente y reemplazar los revestimientos de las paredes con regularidad para mantener una captura efectiva puede resultar económicamente inviable.	China
2	L. W. Kamionka	Materiales no convencionales	2023	Elsevier	Ladrillos eco-amigables se usan en viviendas unifamiliares para promover sostenibilidad ambiental, con estándares como LEED y BREEAM.	Pese a que los materiales amigables contribuyen con la reducción de la huella de carbono y con nuevas posibilidades creativas para los arquitectos, aún persiste la necesidad de unos análisis más detallados de tales materiales no convencionales a favor de la mejora de las condiciones sostenibles y arquitectónicas.	Polonia

[Diego Jesus Aranda]

3	PS Narendhran, S Parthasarathy, S Vignesh, A Mouliyarasu, S Prashanth, A Jayaraman and M Vasudevan	Suelo rojo	2023	IOPScience	Los ladrillos de suelo rojo modificado con cemento y cal al 15% ofrecen alta resistencia y son una opción sostenible para la construcción de viviendas.	La disponibilidad y uniformidad de los aglutinantes empleados, como la cal, el cemento y las cenizas volantes, pueden ser variables según la región o país. Esta diversidad podría dificultar la disponibilidad de estos materiales o conducir a fluctuaciones en su calidad y composición, lo que a su vez podría comprometer la capacidad de replicar los resultados en diversos entornos.	India
4	C. Alvarez y A. Orado	Ceniza de cáscara de arroz como material puzolánico en el concreto	2023	Semantic Scholar	La sustitución parcial del cemento en concreto con un material alternativo (ceniza de cascara de arroz) mejora la sostenibilidad de la industria de la construcción al reducir su impacto ambiental.	La calidad y las características de la ceniza de cáscara de arroz pueden variar según su origen y proceso de producción. Esta variabilidad podría influir en los resultados del estudio y limitar su generalización a otras ubicaciones o condiciones de producción de la ceniza de cáscara de arroz	Perú

5	Scrivener KL, John VM, Gartner EM	Cementos ecoeficientes	2018	Elsevier	Los cementos ecológicos de bajo CO2 de UNEP-SBCI serán clave en el mercado, liderados por el clínker de cemento Portland	Las propiedades de reacción de los Materiales Cementantes Suplementarios (SCM), como la escoria granulada de alto horno y las puzolanas (cenizas volantes y arcillas calcinadas), pueden variar, lo que influye en su capacidad para endurecerse en comparación con el clínker en la fabricación de cemento. Además, se requiere reducir al mínimo la cantidad total de clínker necesario para mitigar el impacto ambiental, lo que podría restringir la utilización de los SCM en ciertos contextos.	Brasil
6	D. Fouad, M. Farag, D. Fouad, and M. Farag	Almidón	2019	OUCI	Las fibras de almidón son completamente biodegradables, provenientes de recursos renovables y económicamente viables para la construcción	A medida que se aumenta el contenido de fibra a la materialidad más allá de ciertos porcentajes como del 80%, tiende a verse que las propiedades se deterioran en lugar de mejorar.	Egipto
7	G. Fahim, A. Rahman, H. Amer, and R. Alyousef	Hormigón sustentable incorporado con microorganismos efectivos y cenizas vo-lantes	2021	ScienceDirect	Hormigones modificados con microorganismos y cenizas volantes aumentan resistencia y reducen emisiones de CO2.	Una desventaja del hormigón que contiene microorganismos es su retraso que muestra en el desarrollo de la fuerza en la etapa inicial.	Malasia

8	Y. Hu, W. Liu, Q. Zhang, X. Hu, and X. Hu	Cemento preparado con microorganismos microencapsulados	2022	Pubmed	El mortero con microorganismos microencapsulados es una solución sostenible para reparar grietas en construcciones, mostrando una mayor estabilidad térmica con pH=8 y tamaño de partícula de 100 µm.	Aún queda necesario la realización de más pruebas con el fin de conocer la influencia de la cantidad de microcápsulas autorreparables sobre el tiempo de fraguado del mortero de cemento para ver si se cumplen con los requisitos de construcción.	China
9	S. Niyasom and N. Tangboriboon	Hormigón verde	2021	ScienceDirect	El uso de fibras naturales como jacinto de agua, fibra de plátano y polvo de cáscara de huevo mejora las propiedades físicas y mecánicas del hormigón, siendo una alternativa sostenible y eficaz.	Pese a que las muestras integradas con fibra de jacinto de agua y fibra de plátano tuvieron alta resistencia a la tracción, también evidenciaron niveles bajos de resistencia a la compresión.	Tailandia
10	M. Yadav and A. Saini	Hempcrete	2022	ScienceDirect	Hempcrete, mezcla de cáñamo, cal y agua, es una alternativa ecológica en construcción, eficiente en energía y reciclable, con propiedades ignífugas y capacidad para absorber CO2.	A pesar de sus numerosos beneficios, Hempcrete presenta restricciones en torno a su estructura porosa que disminuye su rendimiento mecánico y aumenta su capacidad de retener agua.	India

11	I. Răut et al	Biomaterial compuesto de redes de hifas de hongos cultivadas	2021	MDPI	Material biodegradable con fibras lignocelulósicas, polipropileno y esporas bacterianas, resistente y manipulable para construcción ecoamigable.	Se requiere de más investigaciones para mejorar la homogeneidad de la mezcla con el propósito de obtener un material más sólido con una amplia gama de rendimientos y funciones potenciales.	Rumania
12	Y. Yang	Retardantes ignifugo	2024	ScienceDirect	Nuevos materiales aislantes térmicos biológicos, como la celulosa de medula de maíz y el alginato con retardante de fuego bioeficiente, ofrecen mejoras significativas en la construcción sostenible.	A pesar de que los materiales de origen biológico presentan buenos resultados frente al fuego y otras propiedades, se evidencia pocos cambios en las propiedades mecánicas.	Corea del Sur
13	C. Maraveas	Residuos agrícolas	2020	MDPI	Residuos agrícolas como la ceniza de cáscara de arroz, bagazo de caña de azúcar y hoja de bambú se reconocen como alternativas prometedoras para materiales de construcción sostenibles, ofreciendo una opción viable a los materiales convencionales.	Las deficiencias de los materiales de construcción a base de residuos agrícolas recaen en su naturaleza liviana, pues solo se aplican a ciertos aspectos estructurales, especialmente en donde las cargas estructurales suelen ser las más bajas y también se debe de tener una gran experiencia para su fabricación.	Grecia

14	S. Lal	Ceniza de paja de trigo	2022	Scopus	Se sustituye parte de la arena con ceniza de paja de trigo y se añade fibra de polipropileno para mejorar las propiedades del concreto y aprovechar residuos agrícolas.	Se necesita de un mejor análisis del material para ser más eficiente en el diseño de estructuras y en la optimización operativa de la reducción de residuos.	India
15	A. Adamatzky, H. A. B. Wösten, and J. Dessi-Olive	Micomateriales	2022	MDPI	Los micomateriales transforman residuos orgánicos en productos útiles para construcción, reduciendo la dependencia de recursos naturales limitados y mitigando impactos ambientales.	El almacenamiento de estos materiales es un desafío, ya que tienen que mantenerse en aproximadamente 4 °C con el fin de evitar que los hongos crezcan demasiado rápido y consuman de forma completa el sustrato.	Estados Unidos
16	López L, Césare M, Gonzales H, Acevedo M, Cobeñas-Nizama P, Paucar S, Trillo Noelia	Vegetal (Bambú)	2020	Alicia	La producción de bambú en la Selva Central aumenta debido a la demanda de materiales de construcción sostenibles, ofreciendo soluciones económicas a las comunidades rurales.	El material del bambú suele ser visto desde la perspectiva de material secundario para la decoración de locales, vigas y hasta pórticos de establecimientos comerciales, debido a su poca capacidad de resistencia a alturas mayores de los dos pisos.	Perú

[Biodiseño de Materiales de Construcción Sostenibles]

Nota: La tabla contiene la totalidad de artículos seleccionados según los autores, título, año de publicación, nombre de la revista, el aporte a la investigación y el país donde se publicó.

Contenido de la investigación

En la actualidad nos encaminamos a un futuro en el que las empresas constructoras y de manera general todas las organizaciones tendrán que adaptarse al entorno de la sostenibilidad acorde a la adopción de herramientas con modelos medioambientales y económicas capaces no solo de repotenciar la calidad de vida de las personas, sino de preservar los recursos que las futuras generaciones requerirán para cubrir sus necesidades (Franco & Cusme, 2022). Ante ello surge la teoría de la innovación que guarda relación con el sector constructivo, pues viene a ser entendida como la aplicación de nuevas tecnologías, procesos y materiales para el mejoramiento de la eficiencia como de la misma sostenibilidad en aquellos proyectos de construcción, debido a que últimamente este sector viene siendo abrumado por la planificación de recursos (Lujan, 2024). Es así que, la necesidad de la innovación en el campo de diseño y construcción ahonda en la introducción de mejoras significativas en las viviendas, materiales constructivos, procesos y servicios teniendo como noción lo indicado por Norman Foster, quien expone que “innovar no significa inventar cosas nuevas, sino combinarlas de forma revolucionaria”; en base a ello, surge el biodiseño como una estrategia de sostenibilidad para el uso de materiales sostenibles en las construcciones como un elemento diferenciador clave que puede llegar a atraer a un segmento de clientes potenciales muy interesantes (Carmona, 2024).

Biodiseño y estrategias de sustentabilidad

Biodiseño

El biodiseño se define como aquella extensión del diseño bioinspirado, el cual va más allá de los alcances iniciales puesto que se incorporan componentes orgánicos que pueden ser vivos o que alguna vez lo fueron, su idea de analizar soluciones biológicas para el desarrollo de nuevos materiales comenzó en la década de 1920 en base a la Biónica y a medida que pasó el tiempo se fue expandiendo y aplicando en diferentes campos

(Alquezar Facca, 2023). Incluso, de acuerdo con Esat y Ahmed-Kristensen (2018), el biodiseño se tiende a clasificar en dos categorías fundamentales:

- Aplicaciones que involucran un organismo vivo: los cuales tienden a ser genéticamente modificados o no, tales como la incorporación de bacterias en el concreto.
- Aplicaciones que involucran biomasa no viva: las cuales son derivadas de un organismo vivo o cuya biomasa muerta fue alguna vez un organismo vivo, tales como la celulosa que es utilizada en la *Biocouture*.

Estrategias de sustentabilidad

Las estrategias de sustentabilidad implican una serie de acciones planificadas y sistemáticas destinadas a fomentar prácticas y procesos que equilibren los aspectos económicos, sociales y ambientales. Estas estrategias surgen como respuesta a los desafíos ambientales a largo plazo. Se destacan tres hitos importantes en este contexto: la Declaración de Brundtland a nivel mundial, la Conferencia de las Naciones Unidas en Río que condujo a la creación de la Agenda 21, y la adopción de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y la Agenda 2030 en 2015. Todas estas acciones tienen como objetivo común asegurar un futuro sustentable para el planeta (García, 2021).

Casos de biodiseño de materiales en el contexto internacional

Últimamente, a nivel global, ha surgido la necesidad de adoptar nuevas prácticas sostenibles, pues a medida que crece la conciencia global sobre los desafíos ambientales los arquitectos, ingenieros y partes interesadas se orientan cada vez más en la búsqueda de prácticas constructivas respetuosas con el medio ambiente, de ahí nace el biodiseño de materiales que vienen a ser derivados de los recursos renovables surgiendo como una alternativa prometedora para revolucionar el sector de la construcción (Chen et al.,

2024). Por lo tanto, la promoción del uso de materiales constructivos renovables para la conservación de los recursos y el mejoramiento de la eficiencia energética viene a ser una característica esencial para neutralizar el carbono de la industria de construcción, a través de una nueva perspectiva constructiva a partir de sustancias orgánicas, subproductos agrícolas y hasta materiales de desecho. Es así que en las siguientes líneas se detallan diferentes casos del biodiseño de materiales que visibilizan su empleo para diferentes elementos estructurales.

Almidón: Para que un material sea completamente biodegradable, todos sus componentes deben ser biodegradables y deben provenir de recursos renovables. Las fibras de almidón cumplen ambas condiciones y su fabricación es económicamente rentable para su aplicación en la construcción (Fouad & Farag, 2019).

Biomasa: Los materiales de construcción potenciales derivados de carbohidratos, como la fibra, el biocarbón y las huminas, son considerados como candidatos prometedores. Sus características, tales como la porosidad, la resistencia mecánica y la estabilidad térmica, desempeñan un papel crucial en el proceso de aprovechamiento de residuos (Xiong et al., 2020).

Materiales no convencionales: Los ladrillos elaborados a partir de arcilla, paja, cáñamo, conform (residuos orgánicos), hy-fl (ladrillos elaborados a partir de desechos agrícolas), mediante protocolos de evaluación como LEED (Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental), BREEAM (Método de Evaluación Ambiental de Edificios de Investigación), entre otros similares son empleados en el diseño de proyectos de viviendas unifamiliares con un enfoque integral hacia la amigabilidad con el medio ambiente (Kamionka, 2022).

Suelo rojo: Los ladrillos fabricados a partir de suelo rojo nativo utilizando un método de adobe modificado emplean una combinación óptima de aglutinantes de bajo costo. La mezcla equimolar de cemento y cal al 15% ofrece una alta resistencia a la compresión de

6.43 N/mm². Estos bloques elaborados representan una excelente alternativa sostenible para abordar la creciente demanda de viviendas (Narendhran et al. 2022).

Hormigón sustentable incorporado con microorganismos efectivos y cenizas volantes:

Corresponde a hormigones modificados que se preparan mediante la sustitución del cemento Portland ordinario (OPC) por el microorganismo eficaz (EM) y las cenizas volantes (FA) en una proporción óptima que tienden a revelar resultados eficaces, ya que las propiedades de tales mezclas de concreto mejoran significativamente producto de la incorporación del EM y FA con una resistencia a la compresión que se incrementa hasta en un 30%, lo que a su vez conlleva a una reducción de la emisión de dióxido de carbono, del consumo de energía y del mismo coste, por lo que se ha determinado que dicha materialidad llega a ser amigable con el medio ambiente al posibilitar una menor emisión de gases de efecto invernadero [25].

Cemento preparado con microorganismos microencapsulados:

El mortero con microorganismos microencapsulados surgen como una medida sostenible para reparar grietas en las construcciones, sus resultados muestran una adhesión de las microcápsulas a las superficies de las fracturas debido a su rugosidad que tienden a tener efectos beneficiosos, lo que ha determinado que las microcápsulas con un pH = 8 y un tamaño de partícula de 100 µm son las que presentan una mayor estabilidad térmica; a raíz de ello, se expone que dicha materialidad resulta ser una alternativa sostenible para el entorno constructivo (Hu et al., 2022).

Hormigón verde: Constituido por fibras de Jacinto de agua, fibra de plátano y polvo de cáscara de huevo como rellenos de biomateriales para el refuerzo del hormigón, los cuales se obtienen a partir de desechos agrícolas y de pos consumo, dando como resultado un mejoramiento de las propiedades físicas del concreto en torno a la absorción de agua y densidad; así como, a la mejora de las propiedades mecánicas respecto a la resistencia a la compresión, a la tracción, la flexión y carga máxima;

por tal motivo, el uso de materiales de refuerzo naturales suelen ofrecer numerosas ventajas que respetan al medio ambiente y representan una estrategia viable para la sostenibilidad constructiva (Niyasom & Tangboriboon, 2021).

Hempcrete: Corresponde a un material de construcción conformado por una mezcla entre el cáñamo, la cal y el agua, la cual viene a ser una alternativa respetuosa con el medio ambiente, ya que es capaz de reducir los residuos y disminuir el uso de recursos naturales como de la misma energía, en ella el cáñamo es un material constructivo que suele ser técnicamente eficiente al utilizar menos energía, ser reciclable y funcionar como un sumidero de CO₂; además, Hempcrete es resistente al fuego, por lo que ofrece muchas oportunidades ambientales y de construcción (Yadav & Saini, 2022).

Biomaterial compuesto de redes de hifas de hongos cultivadas: Incluye lignocelulósicos y trips de polipropileno incrustados con esporas bacterianas, las cuales dan lugar a una estructura ligera, densa, inquebrantable y biodegradable que permite una fácil manipulación sin el riesgo de que ésta se desintegre, dicho material ofrece una serie de ventajas como seguridad, ser una estructura inerte, renovable, natural, verde y sobretodo biodegradable por la naturaleza al estar constituida por materiales biodegradables como la paja de trigo y el micelio de hongos, lo que la denomina como una alternativa ecológica para la producción de composites para el ámbito de la construcción en comparación con otros productos comerciales que son elaborados a partir de recursos no renovables (Räut et al., 2021).

Cementos ecoeficientes: Los cementos ecológicos y de bajas emisiones de CO₂ desarrollados por un equipo comprometido con la iniciativa de Construcción Sostenible y Clima del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP-SBCI) están destinados a desempeñar un papel crucial en el mercado. Se espera que los cementos elaborados a partir de clínker de cemento Portland lideren el mercado debido a su

importancia y demanda creciente (Scrivener et al., 2018).

Retardantes ignifugo: La fabricación de materiales aislantes térmicos de origen biológico utilizando celulosa de medula de maíz, alginato y retardante de fuego bioeficiente es un avance significativo en la industria de la construcción. Estos innovadores materiales, como los biocompuestos de PLA reforzados con fibras naturales y el efecto sinérgico de PA-THAM y OCC, muestran un gran potencial para la construcción sostenible al mejorar las propiedades térmicas clave necesarias para el aislamiento eficiente (Yang, 2019).

Residuos agrícolas: Se han reconocido una variedad de desechos agrícolas, como la ceniza de la cáscara de arroz (RHA), la ceniza del bagazo de caña de azúcar (SCBA) y la ceniza de hoja de bambú (BLA), como alternativas prometedoras para la creación de materiales de construcción sostenibles. Estos desechos tienen el potencial de sustituir a los materiales de construcción convencionales (Maraveas, 2020).

Ceniza de paja de trigo: Para preparar este concreto, se realiza una sustitución parcial de la arena con ceniza de paja de trigo y se añade fibra de polipropileno. La paja de trigo es el remanente que queda después de la cosecha del cultivo de trigo, y en muchos países se considera un residuo. La incorporación de fibras en el concreto es una técnica utilizada para mejorar sus propiedades estructurales (Lal, 2022).

Micomateriales: Estos micomateriales se emplean en el proceso de biodeselado de materiales sostenibles al hacer uso de la capacidad de los hongos para convertir residuos orgánicos en productos útiles y duraderos que pueden ser empleados en la construcción de unidades de edificación. La fabricación de estos materiales no solo tiene el potencial de disminuir la dependencia de los recursos naturales limitados, sino que también puede ayudar a reducir los impactos ambientales relacionados con la producción de materiales de construcción convencionales (Adamatzky et al., 2022).

Casos de biodiseño de materiales en el contexto peruano

A continuación, se describen los principales casos de biosideño de materiales desarrollados en el ámbito peruano, las cuales no solo minimizan la generación de residuos, sino que corresponden a un inicio de estrategias de sustentabilidad en el sector de construcción del país para la mitigación del cambio climático global, entre ellas se tiene a:

Ladrillo de concreto a base de cascarilla de arroz: Desarrollado por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) para masificar el uso de la cascarilla de arroz molida e incinerada como un elemento esencial para la fabricación de materiales que permitan viviendas seguras (Figura 1), de bajo costo y más flexibles durante eventos sísmicos, ya que al ser un desecho agroindustrial es capaz de sustituir una parte del cemento y con ello lograr una reducción en el gasto de producción tanto para ladrillos, techos prefabricados, tejados, adoquines de suelos y hasta morteros (Vargas, s.f.).

Figura 1

Construcción de un modelo de vivienda por ladrillos de concreto a base de cascarilla de arroz



Ceniza de cáscara de arroz como material puzolánico en el concreto: Es una opción viable que contribuye con la reducción del impacto ambiental en referencia a la producción del cemento, pues dicho material mejora las propiedades físico-mecánicas del concreto en el aspecto de sustitución porcentual del cemento, lo que la convierte en un material alternativo

para la sostenibilidad de la industria de construcción [36].

Materiales de construcción a partir del bambú:

La demanda de materia prima para construcción y la reducción de bosques impulsan la producción de bambú en la Selva Central. Sus condiciones climáticas y altitudinales, junto con la búsqueda de alternativas económicas y ambientales, han llevado a los productores a expandir el cultivo de bambú en la región. La especie *Dendrocalamus asper* es utilizado como material sostenible para las construcciones locales (postes, sobrepisos y vigas), y la *Gadua* (bambu leñoso) es usado para la construcción de pisos laminados. Estas alternativas han sido vitales para las comunidades rurales, ofreciendo soluciones climáticas y sostenibles. La demanda de cañas para construcción y decoración, como las especies *Guadua angustifolia* y *Phyllostachys aurea* tienen un mercado potencial, con la selva central como principal proveedor, abasteciendo principalmente a Lima por lo que se requieren políticas de desarrollo que combinen la explotación forestal con la conservación ambiental.

Por otro lado, en Perú no existen muchos materiales biodiseñados a partir de microorganismos, aunque sí existen investigadores peruanos que han desarrollado materiales constructivos ecológicos a raíz de reciclajes y polímeros, los cuales abren oportunidades tanto de reutilización de plásticos como de la exploración de nuevos productos sostenibles capaces de prevenir el desequilibrio ecológico:

Ladrillos ecológicos a base de polímeros: Se trata de Kontiki SAC, el cual corresponde a un tipo de ladrillo muy resistente a la humedad y al frío que surge para hacer frente a los altos niveles de contaminación producidos por la industria de ladrillos, su elaboración se da en un secado al frío y son hasta tres tipos de ladrillos: el macizo, el de dos alveolos y el tipo canaleta (Figura 2), su costo de producción es 20% más económico que los convencionales, mientras que su resistencia radica en los aditivos no tóxicos que permiten una estabilización

que eleva el poder y uso de las tierras de unos 3 a 27 veces su capacidad, ya que dichos polímeros cambian la polaridad del suelo convirtiendo la tierra inservible que se desecha durante las construcciones de carreteras en un material de valor, en base a ello se utilizó dicho material para la construcción de ladrillos que tienden a ser usualmente fabricados a base de tierra (Vergara, 2021).

Figura 2

Bloques de ladrillos ecológicos cuyo armado es tipo lego, la cual compete al ladrillo de dos alveolos



Ladrillos y piezas constructivas con plásticos reciclados del cultivo de banano orgánico: Es un material desarrollado por investigadores de la Universidad de Piura (UDEP) en el que se utiliza el plástico residual de los cultivos de banano orgánico para la creación de ladrillos junto con otras piezas de construcción que permiten la edificación de estructuras arquitectónicas amigables con el ambiente (Figura 3). Tales polietilenos reciclados son una materia prima limpia y noble que tiende a ser un buen aislante, su proceso de transformación inicia en el acopio de residuos, luego pasa a la zona de granulado, continua con la fase de trituración y después se realiza su procesamiento con la máquina extrusora para la generación de piezas en moldes, finaliza con los procesos de enfriamiento de los bloques, su desmolde y su respectivo almacenaje, su diseño es similar a piezas de lego que facilitan un armado más rápido sin la necesidad de hacer uso del cemento u otro tipo de argamasa para su unión; además, no es necesario la realización de un

tarrajeo, pues al ser muy versátil posibilita el logro de edificaciones no convencionales que se mimetizan con la naturaleza (Zuta, s.f.).

Figura 3

Construcción de módulos a base de ladrillos con plásticos reciclados como una medida para atender la demanda de viviendas



Resultados

En la revisión sistemática se identificó un total de artículos según la búsqueda realizada. Sin embargo, solo se seleccionaron 16 artículos que cumplían con los criterios de inclusión. A continuación, se presenta un análisis descriptivo de las publicaciones según el contexto de la investigación.

Análisis descriptivo de los artículos

Es relevante destacar que, de los 16 artículos analizados, una mayoría significativa de ellos (14) abordan casos y situaciones de contexto internacional, mientras que los restantes 2 se enfocan en aspectos y eventos de ámbito nacional. Este hallazgo resalta la diversidad y amplitud del alcance geográfico de las investigaciones consideradas en este análisis. La preponderancia de los casos internacionales, representando el 87.5% del total, sugiere un enfoque amplio y global en la exploración de temas específicos, mientras que el 12.5% restante, correspondiente a los casos nacionales, refleja la importancia de comprender

y abordar cuestiones locales dentro de un marco más amplio de análisis. Esta distribución equilibrada entre casos internacionales y nacionales proporciona una perspectiva completa y enriquecedora que contribuye al conocimiento y comprensión de los fenómenos estudiados.

Por otro lado, los artículos consultados para el caso de biodiseño de materiales en el contexto internacional revelan una amplia variedad de opciones novedosas y prometedoras. Desde el empleo de almidón como un recurso biodegradable y económico (García, 2021), hasta la exploración de la biomasa derivada de carbohidratos como la fibra y el biocarbón (Chen et al., 2024). Cada avance representa un paso hacia la edificación más amigable con el entorno. El uso de materiales poco convencionales, como los ladrillos hechos de arcilla y paja (Fouad & Farag, 2019), junto con el desarrollo de hormigones sostenibles que incluyen microorganismos y cenizas volantes (Fahim et al., 2021), reflejan un compromiso renovado con la reducción de emisiones y la eficiencia energética en el sector de la construcción. Además, la integración de tecnologías como el cemento con microorganismos encapsulados (Hu et al., 2022) y la utilización de materiales reforzados con fibras naturales (Niyasom & Tangboriboon, 2021), indican una tendencia hacia prácticas constructivas más sostenibles y resilientes. Estos avances, motivados por la necesidad de mitigar el impacto ambiental de la construcción, representan un cambio significativo hacia métodos de construcción más responsables y conscientes del medio ambiente.

En cuanto a los resultados de los casos analizados en el contexto peruano, solo se han ubicado un porcentaje mínimo de artículos que ahondan en el biodiseño de materiales constructivos capaces de minimizar el impacto negativo que generan las edificaciones de la actualidad, lo que significa que el país aún no está del todo encaminado a la implementación de nuevas prácticas de construcción sostenible a diferencia de otros países. A pesar de ello, una serie de profesionales entre investigadores e ingenieros han demostrado

principios de adopción de opciones sostenibles orientados a la propuesta de materiales que respetan el medio ambiente, tal es el caso del ladrillo de concreto a base de cascarilla de arroz el cual fue desarrollada por ingenieros de la UNI en base a productos naturales capaces de soportar movimientos telúricos (Kamionka, 2022). De igual forma, Alvarez Quispe y Orado Paredes (2023) propusieron una ceniza de cáscara de arroz como un material puzolánico para el concreto como una opción viable para la reducción del impacto ambiental, mientras que otros plantearon materiales ecológicos que buscaron el reciclaje del plástico producido en diferentes ámbitos como es el caso de ladrillos ecológicos a base de polímeros (Vergara, 2021) y ladrillos junto con piezas constructivas formadas a partir de plásticos que se fueron reutilizando de los cultivos de banano (Zuta, 2022). Los cuales vienen a ser un inicio hacia las prácticas de sostenibilidad en el ámbito nacional que ameritan ser replicadas en todas partes.

Discusión

La finalidad a la que estuvo orientada el presente estudio se ve reflejada en el análisis de casos de biodiseños de materiales para la construcción como estrategias de sustentabilidad. Por lo cual se ha analizado, tanto en contextos internacionales como nacional, diferentes casos de biomateriales que nacen como prácticas sostenibles para hacer frente a la contaminación que genera el sector constructivo. Respecto a la discusión de los resultados de los artículos en contextos internacionales en el ámbito del biodiseño de materiales para la construcción como estrategia de sustentabilidad revela hallazgos significativos. Estos estudios demuestran la viabilidad y efectividad de utilizar materiales biodegradables y provenientes de fuentes renovables en la construcción, respaldando así el objetivo principal del análisis. Además, los materiales diseñados de manera sostenible ofrecen propiedades físicas y mecánicas adecuadas para su aplicación en diversos contextos constructivos, lo que sugiere que pueden ser una alternativa viable a los materiales convencionales. A nivel más amplio, la adopción

generalizada de estos materiales podría tener un impacto significativo en la reducción de los efectos ambientales negativos asociados con la construcción.

En el ámbito de las futuras investigaciones, se enfatizan áreas como el desarrollo de nuevos materiales, tanto aquellos que involucran organismos vivos como los derivados de biomasa no viva. Estas áreas de investigación coinciden con la clasificación de categorías fundamentales del biodiseño de Esat y Ahmed-Kristensen (2018), quienes distinguen entre aplicaciones que implican organismos vivos y aquellas que involucran biomasa no viva. Asimismo, se destaca la importancia de realizar estudios a largo plazo para evaluar el rendimiento de estos materiales y técnicas en condiciones reales. Estos esfuerzos podrían impulsar prácticas de construcción más sostenibles y guiar el desarrollo de políticas y estándares en la industria hacia un futuro más sustentable.

En el entorno peruano se ha visto una deficiencia de investigaciones y casos que potencien el valor significativo de los biodiseños de materiales para el logro de una sostenibilidad ambiental. Pese a ello, en los últimos años se han venido desarrollando desafíos específicos en la creación de biomateriales a base de productos orgánicos y del reciclaje de plásticos, las cuales no solo han surgido como medios viables ante la contaminación de la industria de ladrillos convencionales, sino como una medida atractiva y de solución para contrarrestar la contaminación al ambiente junto con la reducción del uso de materiales que deterioran los recursos naturales. Dichas situaciones coinciden con la definición de Alquezar Facca (2023), quien sostiene que el biodiseño tiende a incorporar elementos orgánicos que pueden estar vivos o que alguna vez lo han sido. Entonces, todas estas prácticas sostenibles vienen a ser estrategias de sustentabilidad que resultan ser avances prometedores para el sector de construcción en el Perú, pues buscan mitigar la contaminación del medio ambiente y minimizar la generación de residuos. Además, velan por la seguridad y necesidades de los habitantes.

Conclusiones

El análisis realizado sobre los casos de biodiseños de materiales para la construcción como estrategias de sustentabilidad ha revelado hallazgos significativos tanto a nivel internacional como nacional. En el ámbito internacional, se evidenció una amplia variedad de opciones novedosas y prometedoras, desde el uso de recursos biodegradables y renovables hasta la exploración de materiales poco convencionales y tecnologías innovadoras. De los 16 artículos analizados, una mayoría significativa (14 de ellos) aborda casos y situaciones de contexto internacional, lo que representa el 87.5% del total. Este hallazgo resalta la diversidad y amplitud del alcance geográfico de las investigaciones consideradas en este análisis, indicando un enfoque amplio y global en la exploración de temas específicos.

Por otro lado, en el contexto peruano se observa una deficiencia de investigaciones y casos que exploren el potencial de los biodiseños de materiales para promover la sostenibilidad ambiental en la construcción. Sin embargo, se identificaron algunos avances prometedores, como el desarrollo de biomateriales a base de productos orgánicos y el reciclaje de plásticos. De los 16 artículos analizados, solo 2 se enfocan en aspectos y eventos de ámbito nacional, lo que representa el 12.5% del total. A pesar de esta baja representación, estos avances ofrecen alternativas viables para mitigar el impacto negativo de las edificaciones en el entorno natural y contribuir a la reducción de los efectos ambientales negativos asociados con la construcción.

En futuras investigaciones, se recomienda enfocarse en el desarrollo de nuevos materiales sostenibles, tanto aquellos que involucran organismos vivos como los derivados de biomasa no viva. Asimismo, se destaca la importancia de realizar estudios a largo plazo para evaluar el rendimiento de estos materiales en condiciones reales y su impacto en la reducción de los efectos ambientales negativos asociados con la construcción.

Referencias

- Adamatzky, A., Wösten, H. A. B., & Dessi-Olive, J. (2022). Strategies for Growing Large-Scale Mycelium Structures. *Biomimetics*, 7(3), 129. [10.3390/BIOMIMETICS7030129](https://doi.org/10.3390/BIOMIMETICS7030129)
- Alquezar Facca, C., Carvalho, A. R., Tavares de Moraes, V., & Rocha, C. (2023). Biodiseño y Bioaprendizaje: Diálogo con sistemas naturales y complejos. *Cuadernos del Centro de Estudios de Diseño y Comunicación*, (178). <https://doi.org/10.18682/cdc.vi178.8643>
- Alvarez Quispe, C. D., & Orado Paredes, A. Y. (2023). Influencia de la Sustitución Porcentual del Cemento por Ceniza de Cáscara de Arroz en Propiedades Físico-Mecánicas del Concreto -2023. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(4), 6246-6261. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7409
- Beatty, D. N., Williams, S. L., & W. Srubar, W. (2022). Biomineralized Materials for Sustainable and Durable Construction. *Annual Review of Materials Research*, 52, 411-439. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-081720-105303>
- Booth, P., & Jankovic, L. (2022). Novel biodesign enhancements to at-risk traditional building materials. *Front Built Environ*, 8, 1-12. [10.3389/fbuil.2022.766652](https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.766652)
- Carmona, F. (2024). Innovación en Arquitectura: ideas, tendencias y casos de éxito. *Fuen Carmona*. <https://fuencarmona.com/innovacion-en-arquitectura-ideas-tendencias/>
- Carter, M., Tuttle, M., Mancini, J., Martineau, R., Hung, C., & Gupta, M. (2023). Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation by *Sporosarcina pasteurii*: a Case Study in Optimizing Biological CaCO₃ Precipitation. *Applied and Industrial Microbiology*, 89(8), 1-17. <https://doi.org/10.1128/aem.01794-22>
- Chen, L., Zhang, Y., Chen, Z. *et al.* Biomaterials technology and policies in the building sector: a review. *Environ Chem Lett*, 22, 715-750 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01689-w>
- Esat, R., & S. Ahmed-Kristensen, S. (2018). Classification of Bio-Design Applications: Towards a Design Methodology. *DS 92 Proceedings of the DESIGN 2018 - 15th International Design Conference*. <https://doi.org/10.21278/idc.2018.0531>
- Fahim, G., Rahman, A., Amer, H., & Alyousef, R. (2021). Development of a sustainable concrete incorporated with effective microorganism and fly Ash: Characteristics and modeling studies. *Construction and Building Materials*, 285, 1-18. [10.1016/j.conbuildmat.2021.122899](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122899)
- Fouad, D., Farag, M. (2019). Design for Sustainability with Biodegradable Composites. En E. Yasa, M. Mhadhbi, & E. Santecchia (Ed.), *Design and Manufacturing*. 10.5772/INTECHOPEN.88425
- Franco, J., & Cusme, C. (2022). La gestión integral de proyectos de construcción, basada en la sostenibilidad y la innovación. *South Florida Journal of Development*, 3(4), 5647-5663. [10.46932/sfjdv3n4-125](https://doi.org/10.46932/sfjdv3n4-125)
- García, D. E. (2021). *Arquitectura y urbanismo sustentable*. https://books.google.com.pe/books/about/Arquitectura_y_urbanismo_sustentable.html?id=ieRBEEAAQBAJ&redir_esc=y

- Goidea, A., Floudas, D., & Andréen, D. (2022). Transcalar Design: An Approach to Biodesign in the Built Environment. *Infrastructures*, 7(4), 50. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7040050>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGrawHill Education.
- Hernández-Zamora, M. F., Jiménez-Martínez, S., & Sánchez-Monge, J. (2021). Materiales alternativos como oportunidad de reducción de impactos ambientales en el sector construcción. *Tecnología en Marcha*, 34(2), 3–10. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i2.4831>
- Hu, Y., Liu, W., Zhang, Q., Hu, X., & Hu, X. (2022). Investigation of Cement Prepared with Microencapsulated Microorganisms. *ACS Omega*, 7(3), 2947–2959. 10.1021/acsomega.1c05971
- Kamionka, L.W. (2022). Sustainable design in terms of use of environmentally friendly materials. *Środowisko Mieszkaniowe/Housing Environment*, 41(1), 65-77. <https://doi.org/10.4467/25438700sm.22.031.17154>
- Lal, S. (2022). Green Building Design Concept: A Sustainable Approach. *Journal of Mechanical and Construction Engineering (JMCE)*, 2(1), 1–10. 10.54060/JMCE/002.01.003
- Lee, C., Lee, H., & Bin Kim, O. (2018). Biocement Fabrication and Design Application for a Sustainable Urban Area. *Sustainability*, 10, 1–17. 10.3390/su10114079
- Lujan, M. (27 de setiembre de 2024). Innovaciones en la construcción para reinventar el sector. *Innovar o Morir*. <https://innovaromir.com/innovaciones-en-la-construccion-reinventar-sector/>
- Maraveas, C. (2020). Production of Sustainable Construction Materials Using Agro-Wastes. *Materials*, 13(2), 262. 10.3390/MA13020262
- Narendhran, P.S., Parthasarathy, S., Vignesh, S., Mouliyarasu, A., Prashanth, S., Jayaraman, A., & Vasudevan, M. (2022). Envisaging Sustainable Building Materials for Earthen Construction Practices. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1130, 012015. 10.1088/1755-1315/1130/1/012015
- Niyasom, S., & Tangboriboon, N. (2021). Development of biomaterial fillers using eggshells, water hyacinth fibers, and banana fibers for green concrete construction. *Construction and Building Materials*, 283, 1–13. 10.1016/j.conbuildmat.2021.122627
- Ñaupas, H., Valdivia, M. R., Palacios, J. J., Romero, H. E. (2018). *Metodología de la investigación Cuantitativa-Cualitativa y Redacción de la Tesis* (5ª. edición). Ediciones de la U.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Manoj M. Lalu, Tianjing Li, Elizabeth W. Loder, Evan Mayo-Wilson, Steve McDonald ... Alonso-Fernández, S. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 790-799. <https://doi.org/10.1016/j.recresp.2021.06.016>
- Pearlmutter, D., Theochari, D., Nehls, T., Pinho, P., Piro, P. Korolova, A., Papaefthimiou, S., Garcia Mateo, M. C., Calheiros, C., Zluwa, I., Pitha, U., Schosseler, P. Florentin, Y., Ouannou, S., Gal, E., Aicher, A., Arnold, K., Igondová, E., Pucher, B. (2020). Enhancing the

- circular economy with nature-based solutions in the built urban environment: green building materials, systems and sites. *Blue-Green Systems*, 2(1), 46–72. <https://doi.org/10.2166/bgs.2019.928>
- Răut, I., Călin, M., Vuluga, Z., Oancea, F., Paceagiu, J., Radu, N., Doni, M., Alexandrescu, E., Purcar, V., Gurban, A.-M., Petre, I., & Jecu, L. (2021). Fungal Based Biopolymer Composites for Construction Materials. *Materials*, 14(11), 2906. <https://doi.org/10.3390/ma14112906>
- Reinhardt, O., Ihmann, S., Ahlhelm, M., & Gelinsky, M. (2023). 3D bioprinting of mineralizing cyanobacteria as novel approach for the fabrication of living building materials. *Front Bioeng Biotechnol*, (11), 1–14. 10.3389/fbioe.2023.1145177
- Scardifield, K., McLean, N., Kuzhiumparambil, U., Ralph, P. J., Neveux, N., Isaac, G., & Schork, T. (2023). Biomasonry products from macroalgae: A design driven approach to developing biomaterials for carbon storage, *Journal of Applied Phycology*, 36, 935–950. 10.1007/s10811-023-03051-7
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2-26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- Vargas, M. (s.f.). *Proyectan masificar uso de cascarilla de arroz para construir viviendas seguras a bajo costo*, Andina. <https://andina.pe/agencia/noticia-proyectan-masificar-uso-cascarilla-arroz-para-construir-viviendas-seguras-a-bajo-costo-278583.aspx>
- Vergara, I. (2021). Crean ladrillos ecológicos resistentes al frío y a la humedad para zonas altoandinas,” Andina. https://andina.pe/agencia/noticia-crean-ladrillos-ecologicos-resistentes-al-frio-y-a-humedad-para-zonas-altoandinas-856980.aspx?fbclid=IwAR0ZUW3QBrixEQDa6aMdw9aFflyFDQ2SKiK0ExeSCPtCvzO-gqG8FkSHB60_aem_AeCY7-BQ2i7otXavFyeDaAUDhVTrydvP3CXZyWQGMzxpMANhN6M4TsxcMyhd6Ngn5T83LIYRMrgQxe4OnZ7yT6bq
- Xiong, X., Wang, L., Yu, K. M., & Tsang, D. C. (2020). Sustainable carbohydrate-derived building materials, *Bio-based Materials and Biotechnologies for Eco-efficient Construction*, 285–304. 10.1016/B978-0-12-819481-2.00014-3
- Yadav, M., & Saini, A. (2022). Opportunities & challenges of hempcrete as a building material for construction: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 65(2), 2021–2028. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.576>
- Yang, Y. (2019). *Bio-based flame retardant for sustainable building materials* [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya]. <http://hdl.handle.net/10803/668530>
- Yuan, P. F., Chai, H., Yan, C., & Leach, N. (2021). *The 3rd International Conference on Computational Design and Robotic Fabrication (CDRF 2021)*. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-16-5983-6>
- Zuta, L. (s.f.). *Piura: científicos fabrican ladrillos y otras piezas constructivas con plástico reciclado*. Andina. <https://andina.pe/agencia/noticia-piura-cientificos-fabrican-ladrillos-y-otras-piezas-constructivas-plastico-reciclado-890674.aspx>

La certificación ambiental en los proyectos de exploración minera

Resumen

Michael Ramírez Broncano

Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales, Magíster en Regulación, Gestión y Economía Minera; doctorando en Ingeniería Ambiental. Docente a tiempo parcial en la Universidad Nacional del Callao. Investigador en el campo de minería y medio ambiente.

<https://orcid.org/0009-0002-0471-9592>
mmramirez@unasam.edu.pe

El presente trabajo recopila los diferentes instrumentos de gestión ambiental aplicables a los proyectos de exploración minera en el marco de la obtención de la certificación ambiental. Se emplea la investigación documental a través de la búsqueda, organización y análisis de la información. Los proyectos de exploración minera pueden optar por gestionar hasta tres tipos de instrumentos de gestión ambiental: FTA, DIA, EIAAs así como sus respectivas modificatorias según los requerimientos de la organización. Del análisis de la información se concluye que los tiempos de evaluación de los instrumentos de gestión ambiental estipulados en la normativa sectorial difieren de los tiempos reales de evaluación en el caso de la DIA, EIAAs y sus modificatorias.

Palabras clave: permisos, proyecto minero, exploración, minería, certificación ambiental.

Miguel Ramírez Guzmán

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo - Huaraz - Perú.

<https://orcid.org/0009-0007-2950-9950>
mramirezg@unasam.edu.pe

Cómo citar este artículo: Ramírez Broncano, M., & Ramírez Guzmán, M. (2024). La certificación ambiental en los proyectos de exploración minera. *Aporte Santiaguino*, 17(2), Pág. 251–271. <https://doi.org/10.32911/as.2024.v17.n2.1221>

Recibido: 2024-09-20 | **Aceptado:** 2024-11-20



Environmental certification in mining exploration projects

This paper compiles the different environmental management instruments applicable to mining exploration projects, within the framework of obtaining environmental certification. Documentary research is used through the search, organization and analysis of information. Mining exploration projects can choose to manage up to 3 types of environmental management instruments: FTA, DIA, EIAsd as well as their respective modifications according to the requirements of the organization. From the analysis of the information, it is concluded that the evaluation times of the environmental management instruments stipulated in the sectorial regulations differ from the actual evaluation times in the case of the DIA, EIAsd and their modifications. It is expected that the results of this research will help in the optimization of the planning process of environmental permits for mining projects.

Keywords: permits, mining project, exploration, mining, environmental certification

Introducción

El Perú ha sido históricamente reconocido como un país con una rica tradición minera. Los museos peruanos exhiben valiosas piezas de orfebrería provenientes de las diversas culturas que florecieron en nuestro territorio. Sin embargo, durante los primeros años de la República, a partir de 1821, el comercio se convirtió en una prioridad para la consolidación del nuevo régimen republicano, relegando la actividad minera a un segundo plano (Deustua, 2017).

Las actividades relacionadas con la extracción de recursos naturales, especialmente la minería, contribuyen significativamente al crecimiento de la economía nacional (Coayla et al., 2024). En un contexto de mercado en expansión y de precios favorables para los metales, el sector minero peruano se posiciona como

uno de los más atractivos para inversionistas tanto nacionales como internacionales. Esto impulsa no solo el crecimiento de la economía nacional, sino también la dinamización de las economías locales en las áreas de influencia de los proyectos y operaciones mineras.

El ciclo de vida de un proyecto minero se divide en tres grandes etapas: exploración, operación y cierre de mina. La etapa de exploración se centra en la búsqueda de yacimientos minerales que sean económicamente viables para su explotación. En esta fase, se llevan a cabo actividades como la perforación diamantina, con el objetivo de estimar los recursos y reservas de un posible yacimiento. La etapa de operación comienza una vez confirmada la viabilidad económica del proyecto. Durante esta fase, se desarrollan los estudios necesarios para la construcción y puesta en marcha de la operación minera. Las actividades principales incluyen la extracción de minerales mediante métodos de minado subterráneo o a tajo abierto y, generalmente, la implementación de una planta para el procesamiento y beneficio del mineral extraído. Finalmente, la etapa de cierre de mina tiene como objetivo restaurar el área afectada por las actividades mineras a su estado original o a condiciones ambientalmente aceptables. Esta fase incluye actividades como el desmantelamiento y demolición de estructuras, la disposición final de residuos sólidos, la revegetación y otras medidas de recuperación ambiental.

La principal ventaja económica para el país derivada de la operación de unidades mineras es el pago del impuesto a la renta y las transferencias monetarias hacia las regiones, destinadas a la ejecución de proyectos públicos y el sostenimiento del aparato estatal. Por ejemplo, el monto del canon minero depende de la recaudación de impuestos generados por la extracción de recursos naturales, como la minería, a través del gobierno central (Sánchez Alcalde, 2018). De manera similar, la regalía minera constituye un pago que las empresas mineras realizan al Estado como contraprestación económica por la extracción de minerales (Torres Cuzcano, 2014).

No obstante, es importante reconocer que la actividad minera genera impactos ambientales y sociales significativos. En el ámbito ambiental, afecta el medio físico, como el aire, debido al tránsito de vehículos y maquinaria utilizados en las actividades de exploración minera. Este mismo tránsito también impacta el medio biológico al provocar el desplazamiento de especies de fauna local. Por otro lado, en el ámbito social, las actividades mineras suelen alterar las costumbres y tradiciones de las comunidades ubicadas en las áreas de influencia, como resultado de la dinamización económica asociada al proyecto. Si no se implementan los controles adecuados, la calidad ambiental puede verse seriamente comprometida por dichas actividades (Aduvire, 2023). Desde un análisis integral de los impactos generados por los proyectos de exploración y las unidades mineras en operación, se concluye que la expansión de la actividad minera en el Perú ejerce una presión considerable sobre otros recursos naturales, como los hídricos. Esto ha afectado los medios de vida de las personas, así como las relaciones y los modos de vida de los actores sociales involucrados (Bebbington & Bury, 2010).

En respuesta a este escenario, el Estado peruano ha fortalecido la normativa ambiental vinculada al sector minero. Ejemplos de estas medidas incluyen la Ley del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), la Ley de Recursos Hídricos, el Reglamento de Intervenciones Arqueológicas, el refuerzo de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y los Límites Máximos Permisibles (LMP), así como la implementación de mecanismos de participación ciudadana y el proceso de consulta previa.

A pesar de estas medidas, los conflictos socioambientales relacionados con la minería han aumentado en los últimos años. Muchos de estos conflictos surgen debido al incumplimiento de compromisos ambientales y sociales, así como a la percepción de la población de un Estado ausente o con instituciones débiles en las áreas de influencia de los proyectos mineros (Salas Carreño & Hurtado, 2018). En gran parte de las comunidades afectadas, existe una percepción de que las entidades estatales, especialmente

aquellas encargadas de la gestión y fiscalización ambiental, están subordinadas a las políticas de inversión minera y a intereses particulares. Esta percepción ha socavado la legitimidad de las instituciones, provocando que los actores sociales desafíen cada vez más los arreglos institucionales preexistentes (Godfrid et al., 2021). Esto se ha manifestado en protestas, paralización de operaciones y tomas de instalaciones mineras.

Por lo tanto, resulta crucial promover proyectos de exploración minera que permitan el descubrimiento de nuevos yacimientos económicamente viables, reconociendo que no todas las exploraciones conducirán al desarrollo de un proyecto exitoso. La adecuada gestión de los impactos ambientales y sociales, junto con la construcción de confianza entre las comunidades y el Estado, es esencial para garantizar el desarrollo sostenible del sector minero.

Materiales y métodos

La presente investigación documental ha considerado las prácticas sistemáticas para la revisión bibliográfica de diferentes documentos publicados por el Servicio Nacional para las Inversiones Sostenibles (SENACE), Ministerio del Ambiente (MINAM), Ministerio de Energía y Minas (MINEM) y el Sistema Peruano de Información Jurídica (SPIJ). La metodología para la revisión bibliográfica consideró las siguientes etapas: 1) Búsqueda de información, 2) Organización de la Información y 3) Análisis de la información (Gómez-Luna et al., 2014).

Desarrollo y discusión

Proyectos de exploración minera

Cateo y prospección

El ciclo de vida de un proyecto minero inicia con las actividades de cateo y prospección. Este conjunto de actividades engloba los estudios geológicos, geofísica, geotecnia, geoquímica, levantamientos topográficos, recolección de muestras de rocas y minerales de

la superficie, entre otros, siempre que se utilicen instrumentos o equipos que puedan ser transportados sin causar mayores impactos que los provenientes del tránsito ordinario de personas y vehículos menores. Este tipo de actividad no requiere una certificación ambiental. Es importantes precisar que el cateo y prospección no involucran la habilitación de plataformas de perforación ni de sondajes. Las actividades de cateo y prospección no requieren obtener una certificación ambiental (El Peruano, 2020).

Exploración minera

Los proyectos de exploración minera se caracterizan por desarrollar actividades que involucran la habilitación de plataformas para la ejecución de sondajes diamantinos. Además, incluyen componentes auxiliares a la actividad de exploración. Los proyectos de exploración minera requieren obtener una certificación ambiental otorgada por el Ministerio de Energía y Minas (MINEM).

Instrumentos de gestión ambiental aplicables a los proyectos de exploración minera

En la siguiente tabla se resumen los tipos de instrumentos de gestión ambiental aplicables a los proyectos de exploración minera.

Modificación de los instrumentos de gestión ambiental aplicables a los proyectos de exploración minera

La modificación de un IGA será necesaria cuando el proyecto requiera implementar cambios a los componentes (reubicación, reducción o ampliación de componentes) previamente aprobados en un IGA primigenio. Esta modificación debe ser gestionada antes del término de la vigencia de la certificación ambiental (cronograma de ejecución); en caso contrario, se deberá elaborar y gestionar un nuevo IGA.

Al momento de planificar la modificación de un IGA es importante considerar que, si los cambios propuestos se ubican dentro de áreas naturales protegidas o sus zonas de amortiguamiento, áreas de conservación regional, en ecosistemas frágiles o áreas arqueológicas, se deberá solicitar opinión técnica vinculante al SERNANP, ANA, SERFOR, MINCUL o IPEN, según corresponda.

Comunicación previa

Si los cambios propuestos se encuentran alineados a alguno de los supuestos del Anexo 1 del Reglamento de Gestión Ambiental para las exploraciones Mineras, bastará con presentar una comunicación previa a la autoridad competente.

Se debe considerar que la comunicación previa es aplicable siempre que no infrinja las condiciones (Tabla 1) y no modifique el área previamente aprobada en el IGA. También se encuentra restringida a modificaciones que realicen sobre humedales, bofedales, ríos, lagos, lagunas, nevados, glaciares, fajas marginales, bosque de neblina, bosques relictos, áreas naturales protegidas, zonas de amortiguamiento u otras zonas sensibles ni implique cambio en los compromisos socioambientales asumidos en el IGA aprobado.

La comunicación previa no se considera certificación ambiental para el trámite de los permisos operacionales ante la Dirección General de Minería (DGM).

Tabla 1*Descripción de los IGAs para proyectos de exploración minera*

Clasificación de los proyectos de exploración minera		
Descripción del proyecto	Instrumento de Gestión Ambiental (IGA)	Consideraciones
<p>Proyectos sin impactos ambientales significativos que consideren:</p> <ul style="list-style-type: none"> Hasta 10 plataformas de perforación Área máxima disturbada: 5 Ha Distancia mínima de 100 metros desde las plataformas a los cuerpos de agua, bofedales, canales de conducción de agua subterránea, manantiales o puquiales. Distancia mínima de 100 metros desde las plataformas o proyecciones de los sondajes (hacia la superficie), a la huella máxima en invierno de un nevado o área glaciario, a tierras de protección y/o bosques primarios 	Ficha técnica Ambiental para proyectos de exploración minera de menor complejidad (FTAmc) **RM_237-2024-MINEM-DM	<p>Las modificaciones propuestas para una FTAmc no podrán considerar la ampliación del número máximo de plataformas (10) ni del área efectiva máxima a disturbar (5 Ha), ni el área de influencia ambiental directa aprobada. No podrá presentarse de manera simultánea o sucesiva, en la misma zona, 2 FTAmc.</p> <p>IGA complementario al SEIA</p>
<p>Proyecto sin impactos ambientales significativos que consideren:</p> <ul style="list-style-type: none"> Hasta 20 plataformas de Perforación 	Ficha Técnica Ambiental (FTA) * D E C R E T O SUPREMO N° 042-2017-EM	IGA complementario al SEIA
<p>Proyectos que consideren:</p> <ul style="list-style-type: none"> Hasta 40 plataformas de perforación Área máxima disturbada: 10 Ha Hasta 100 metros de túneles que no se ubiquen subyacentes a la proyección de ecosistemas frágiles, cuerpos de agua o manantiales en temporada húmeda. 	Declaración de Impacto ambiental (DIA)	IGA sujeto al SEIA
<p>Proyectos que consideren:</p> <ul style="list-style-type: none"> 40 a 700 plataformas de perforación Área disturbada mayor a 10 Ha Más de 100 metros de túneles que no se ubiquen subyacentes a la proyección de ecosistemas frágiles, cuerpos de agua o manantiales en temporada húmeda 	Estudio de Impacto Ambiental semi detallado (EIAsd)	IGA sujeto al SEIA

[La certificación ambiental en los proyectos de exploración minera]

Plazos de elaboración y evaluación de los instrumentos de gestión ambiental para proyectos de exploración minera

Tiempo estimado de elaboración

El proceso inicia con la etapa de conceptualización o definición del proyecto. En esta etapa, el titular del proyecto debe evaluar e identificar los componentes que formarán parte del instrumento de gestión ambiental para el proyecto de exploración minera. Esta etapa, además, se caracteriza por el desarrollo de memorias descriptivas de cada uno de los componentes del proyecto. Es importante precisar que el nivel de ingeniería para los instrumentos de gestión ambiental es el nivel de factibilidad.

La segunda etapa en el proceso planificación del permiso ambiental es la de licitación. En ella se considera el desarrollo del documento de alcance del proyecto en base a la información de la etapa 1. En esta etapa se deberá tener en cuenta la contratación de consultoras ambientales que se encuentren en el Registro Nacional de Consultoras Ambientales del SENACE. Se debe seleccionar, además, a la empresa responsable del desarrollo de los estudios complementarios, tales como: estudio hidrológico, estudio geoquímico, estudio hidrogeológico, entre otros.

La tercera y última etapa engloba los trabajos de campo y gabinete para la elaboración del expediente del permiso ambiental. Entre los trabajos de gabinete se puede mencionar a la elaboración de mapas temáticos y desarrollo de los capítulos del IGA, según los términos de referencia establecidos. Entre los trabajos de campo figuran los trabajos de toma de datos de línea de base y la ejecución de los mecanismos de participación ciudadana.

Tiempo estimado de evaluación

El proceso de planificación de los instrumentos de gestión ambiental requiere estimar los plazos de elaboración y evaluación de los IGAs. Para la estimación de los plazos de evaluación se revisaron, del Sistema de Evaluación Ambiental en Línea del Ministerio de Energía y Minas (SEAL – MINEM), un total de 55 Fichas Técnicas Ambientales aprobadas (FTA), 48 Declaraciones de Impacto Ambiental aprobadas (DIA), 09 Informes Técnicos Sustentatorios asociados a Fichas Técnicas Ambientales declarados conformes (ITS – FTA), 19 Informes Técnicos Sustentatorios asociados a Declaraciones de Impacto Ambiental declarados conformes (ITS – DIA), 08 Estudios de Impacto Ambiental semidetallados aprobados (EIA_{sd}) y 18 Informes Técnicos Sustentatorios asociados a Estudios de Impacto Ambiental Semidetallados declarados conformes (ITS – EIA_{sd}). Los resultados corresponden al promedio aritmético de los años 2024, 2023, 2022 y 2021.

Para la estimación de los plazos de elaboración se tomó como referencia un total de 20 procesos de licitación de IGAs asociados a los proyectos de exploración de 03 empresas mineras (mediana y gran minería).

Los plazos legales de evaluación son los plazos descritos en el Decreto Supremo N°042-2017-EM. En la Tabla se presentan los resultados:

Tabla 2*Plazos de elaboración y evaluación de los IGAs para exploración minera*

Permiso ambiental	Autoridad Competente	Plazo de elaboración (días calendario)	Plazo legal de evaluación (días hábiles)	Plazo real de evaluación (días calendario)
Ficha Técnica Ambiental para proyectos de menor complejidad (FTAmc)		150	10	Sin datos a la fecha
Ficha Técnica Ambiental (FTA)		150	10	20
Informes Técnico Sustentatorio – Ficha Técnica Ambiental (ITS – FTA)		45	15	42
Declaración de Impacto Ambiental - DIA/ Modificación DIA - MDIA	Dirección de Asuntos Ambientales	180	30	300
Informes Técnico Sustentatorio – Declaración de Impacto Ambiental (ITS – DIA)	Mineros (DGAAM)	45	15	76
Estudio de impacto Ambiental semidetallado - EIAsd/MEIAsd		240	90	486
Informe técnico sustentatorio – Estudio de Impacto Ambiental Semidetallado (ITS – EIAsd)		45	15	85
Comunicación previa - CP		15	No requiere aprobación	

Conclusiones

Los proyectos de exploración minera requieren de inversiones económicas importantes por parte de los inversionistas que no siempre se traducen en el descubrimiento de un yacimiento minero que sea económicamente explotable, perdiéndose la inversión realizada. Los inversionistas, al invertir en un país, esperan tener los requisitos legales y normativos claros para la ejecución del proyecto minero; cualquier retraso o demora en la ejecución del proyecto puede significar costos económicos adicionales insostenibles.

Bajo la normativa actual, un proyecto minero puede obtener la certificación ambiental mediante la elaboración y gestión de tres instrumentos de gestión ambiental: la ficha técnica ambiental, la declaración de impacto ambiental y el estudio de impacto ambiental semidetallado, los cuales pueden ser modificados, a futuro, según los requerimientos del proyecto de exploración. Sin embargo, los plazos de evaluación

estipulados en la normativa no se concatenan con los plazos reales de evaluación. Esta situación origina una mala planificación de los proyectos mineros, de los tiempos de obtención de los permisos y licencias y los plazos para iniciar las actividades de exploración, con el consecuente retraso del cronograma general de proyecto y generación de sobrecostos.

La presente investigación se convierte en un insumo para la evaluación del plazo legal aplicable a la obtención de la certificación ambiental para los proyectos mineros y para proponer mejoras que coadyuven a cumplir con los mismos. Se abre la posibilidad de extender esta investigación al análisis de los plazos para la obtención de permisos operacionales de la Dirección General de Minería, y también al análisis de los plazos para la obtención de la certificación ambiental para las nuevas unidades mineras.

[La certificación ambiental en los proyectos de exploración minera]

Referencias

- Aduvire, O. (2023). Gestión ambiental en minería: Certificaciones para iniciar y finalizar la actividad minera. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 8, 32–41.
- Bebbington, A. J., & Bury, J. T. (2010). Minería, instituciones y sostenibilidad: desencuentros y desafíos. *Anthropologica del Departamento de Ciencias Sociales*, XXVIII(28), 53–84. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=88636919003>
- Coayla, E., Romero Carrion, V. L., & Bedón Soria, Y. T. (2024). Economic regulation and environmental impact of large copper mining in the development of Peru. *Economía, Sociedad y Territorio*, 24(74). <https://doi.org/10.22136/est20242032>
- Deustua, J. R. (2017). Sociedad, ciencia y tecnología: Mariano de Rivero, la minería y el nacimiento del Perú como República, 1820-1850. *Apuntes*, 80, 51–77. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=684077027002>
- Godfrid, J., Damonte, G., & Minchán, A. P. L. (2021). Institutional innovations in mining contexts: The experience of community water monitoring in Argentina and Peru. *Revista de Ciencia Política*, 41(3), 539–562. <https://doi.org/10.4067/S0718-090X2021005000121>
- Gómez-Luna, E., Fernando-Navas, D., Aponte-Mayor, G., Luis, &, & Betancourt-Buitrago, A. (2014). Literature review methodology for scientific and information management, through its structuring and systematization Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización. *DYNA*, 81(184), 158–163. <http://dyna.medellin.unal.edu.co/>
- Salas Carreño, G., & Hurtado, A. D. (2018). The State, mining concessions and local communities. The many conflicts about mining in the environs of the Qoyllurit'i Shrine (Cusco, Peru). *Colombia Internacional*, 93, 65–91. <https://doi.org/10.7440/colombiaint93.2018.03>
- Sánchez Alcalde, L. A. (2018). Transferencias gubernamentales en el Perú. El caso de la región minera Ancash en un contexto de cambios (2003-2015). *Economía y Sociedad*, XXII(38), 86–109. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=51058253007>
- Torres Cuzcano, V. (2014). Grupos económicos y bonanza minera en el Perú. *Apuntes*, 75, 171–210. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=684077022006>

Revista de Investigación
APORTE SANTIAGUINO
Ingeniería e Innovación
Vol. 17, N° 2, julio - diciembre 2024



AUTORIDADES DE INVESTIGACIÓN

VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN
Dra. Consuelo Teresa Valencia Vera

DIRECTOR DEL INSTITUTO DE
INVESTIGACIÓN
Dr. Yovera Saldarriaga José

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN E
INNOVACIÓN
Mag. Hugo Walter Maldonado Leyva

DIRECTOR DE DERECHOS DE AUTOR
Y PATENTES
Lic. Ilder Edar Cruz Mostacero

DIRECTOR DEL REPOSITORIO
INSTITUCIONAL
Dra. Carmen Tamariz Ángeles



"Una Nueva Universidad para el Desarrollo"

