

Andenes incas: estudio estructural del material adherente

Incas' Terraces: A Structural Study of the Binding Mortar

G. Adriana Camino^{1*}, Aida Zapata²

Resumen

La cultura inca construyó andenes en topografías difíciles que constituyen un patrimonio vivo. Kendall (2004, 2015) presentó una clasificación de andenes agrícolas prehispánicos construidos en el Perú. De los 4 tipos de andenes tipificados, el Tipo 1 (andén inca) demuestra mayor estabilidad estructural y mejor sistema de drenaje que los tipos precedentes (pre-incas). La técnica tradicional de construcción del andén inca es de muro seco en el que las piedras se pircan una sobre otra sin argamasa. En la literatura se indica que la presencia de material aglomerante da adherencia entre los elementos pétreos, durabilidad y mayor estabilidad, aunque pueden limitar su capacidad drenante. En el presente trabajo de investigación se estudió experimentalmente el mortero con varias proporciones de aglomerantes: material arcilloso, material arenoso, cemento, yeso y cal. El mortero de suelo-cemento preparado con 17% de adición de cemento Portland demostró mejor comportamiento físico-mecánico reduciendo la sensibilidad del suelo a las condiciones climáticas, a la acción del agua que lo satura, incrementando la capacidad portante de la estructura, alargando su vida útil y su tolerancia a los ciclos de lluvias y estiaje, prolongando así la frecuencia de rehabilitación y mantenimiento de los muros del andén.

Palabras clave: andén inca, material adherente, argamasa suelo-cemento, mantenimiento.

Abstract

The Inca culture had built terraces in the steep slopes which represent a living heritage. Kendall (2004, 2015) classified the pre-Inca agricultural terraces into 4 different types. Type 1 (Inca terrace) has demonstrated higher structural stability and better drainage than the preceding types (pre-Inca terraces). The construction technique of the Inca terrace corresponds to the dry-wall method, that is, the building rocks are erected without any mortar. It is well known that the binding mortar will provide adherence between building blocks, enhanced durability and stability, although it may limit its draining capacity. In this research work, various mixtures of the binding material using clayed material, sandy aggregate, cement, calcium sulphate and lime were tested experimentally. The mortar soil-cement, prepared with 17% of cement, showed better mechanical response minimizing the sensitivity of the soil to environmental changes, such as water. This mortar enhanced the structure's bearing capacity, extending the service life and reducing the rehabilitation and maintenance needs of the retaining wall.

Keywords: Inca's terrace, binding mortar, mixture soil-cement, wall, maintenance.

1. INTRODUCCIÓN

Estudios previos sobre el sistema de andenería inca, coinciden en indicar que en general los muros de los andenes fueron construidos con piedra seca, sin argamasa de unión (muro seco) (e.g. Wright y Valencia-Zegarra, 2000). Esta técnica es muy conocida y de amplio dominio por los antiguos pobladores. Sin embargo, estas estructuras han sufrido destrucción, abandono, mal estado de conservación y desuso debido a diferentes factores como: el exceso de agua en lugares de difícil manejo, la escasez de agua para el cultivo también ha contribuido al progresivo deterioro. Otros factores influyentes son las lluvias, las sequías, las actividades antropogénicas de pastoreo de ganado y por último el desuso y abandono de estas estructuras por emigración de población rural (Molina, 2004; Dionisio, 2004; Masson, 1992; Cotler, 1985). Partiendo de estudios en la cuenca del Río Rímac y

subcuenca del Río Santa Eulalia Lima-Perú, se señala que del total de 10,533 ha con andenerías, el 22% requieren rehabilitación. Una situación similar de abandono se describe respecto a los andenes centrales de Perú (Kendall, 2015).

Por otro lado, existe evidencia de la utilización de mortero de arcilla en estructuras específicas como en la base de canales de irrigación sobre la base arenosa. Esto con el fin de impermeabilizar el canal (Farrington 1980; Kendall, 2015). El uso de arcilla para propiciar la retención del agua en un andén incaico base parte del conjunto arqueológico de Pisac (Kendall, 2004). Por otro lado, se evidenció la técnica constructiva de andén con aparejo de doble hilera y argamasa de barro en el centro. En la presente investigación se estudiará sistemáticamente la utilización de mortero como material adherente que cohesiona las unidades de piedra en la estructura del muro del andén.

Este estudio se realizó experimentalmente con ensayos y modelos de laboratorio. Los elementos constituyentes de la estructura del andén: el material pétreo como unidad de albañilería y el mortero como material adherente, fueron analizados en sus propiedades y características físico-mecánicas, así como en su influencia en la capacidad portante, durabilidad y frecuencia de mantenimiento de la

* Autora de contacto: gcamino@ualberta.ca

¹ Investigadora Asociada. Department of Civil and Environmental Engineering. Hong Kong University of Science and Technology.

² Profesora. Facultad de Arquitectura e Ingeniería Civil. Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.

estructura de andén inca. La filosofía de diseño está centrada en preservar la tecnología constructiva inca andina, la mano de obra del poblador agrícola y el uso del material de zona para la preparación de morteros.

2. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

El método de investigación experimental consistió en la construcción de modelos de laboratorio de andén tipo 1 (andén inca) a escala natural y reducida (figuras 1 y 2). Primero se estudió el mortero o material adherente entre las piedras del muro del andén. El mortero está constituido por una mezcla de aglomerantes en diferentes proporciones. Se estudiaron tres tipos de mortero: 1) mortero de barro de tierra natural más agua, en una proporción suficiente para

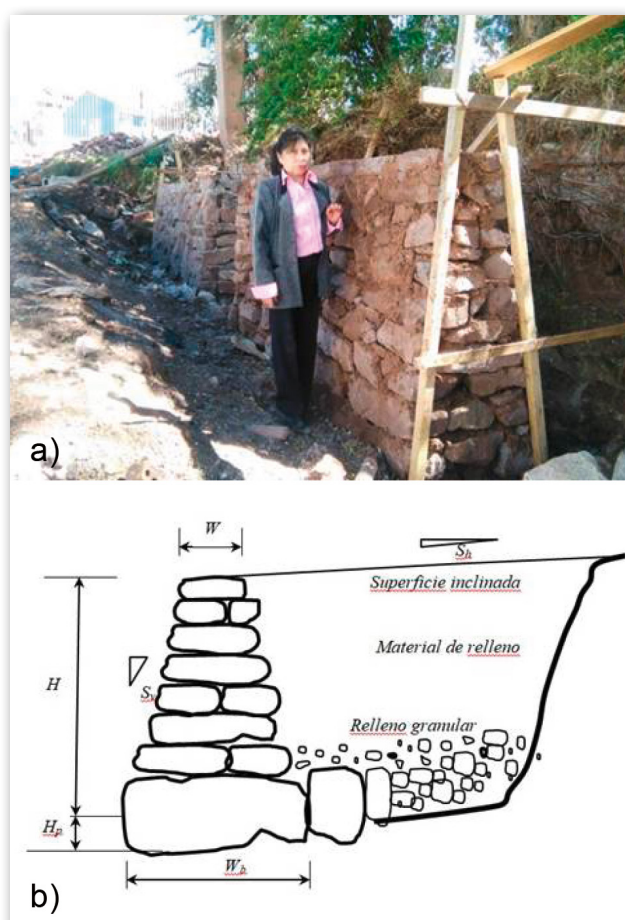


Figura 1. a) Andén tamaño natural; b) Esquema del material de relleno posterior al muro del andén (trasdós).



Figura 2. Muros a escala 1:3, con dos sectores de diferentes morteros.

lograr una masa moldeable; 2) mortero de suelo-cemento en una proporción de 1:5 (cemento Portland: arena que pasa la malla #4) más agua. Esta mezcla requiere más agua que la primera para lograr trabajabilidad con el cemento; y, 3) mortero de cemento-arena en una proporción de 1:3 (cemento Portland: arena que pasa la malla # 4) más agua.

2.1. Materiales

Los materiales seleccionados provienen de la zona Chocco al noroeste de la ciudad del Cusco (Perú), Comunidad Campesina Chocco-Cuartachaca. El material pétreo predominante de la zona es la arenisca roja y gris. En la tabla 1 se presenta el análisis químico elemental del material predominante de zona (roca arenisca, figura 3). Se observa la presencia mayoritaria de SiO_2 en comparación con los otros óxidos componentes que le dan una moderada resistencia mecánica. Esta característica fue comprobada con el ensayo a compresión en núcleos cilíndricos extraídos con diamantina (Camino y Zapata, 2018). El tipo de suelo de las muestras extraídas de calicatas *in situ* (aprox. 1 m² de sección x 1 a 2 m de profundidad) indica que se trata de una arcilla de baja plasticidad (clasificación del suelo según ASTM D-2487-SUCS).



Figura 3. Arenisca roja Chocco-Cuartachaca con contenido de humedad: 11.5%, Límite Líquido: 38.45%, Límite Plástico: 20.81%, Índice de Plasticidad: 17.64%, Granulometría: T.M. : 1", T.M.N.: 3/8".

Tabla 1. Composición Química Arenisca

Composición Química	Resultados (%)
Dióxido de Silíceo	43.58
Trióxido de Aluminio	6.96
Trióxido de Hierro	20.31
Óxido de Calcio	25.21
Óxido de Cobre	0.03
Óxido de Manganeso	0.41
Óxido de Potasio	3.44
Óxido de Zinc	0.054

2.2. Prueba de tiempo de fraguado en morteros

Tiempo de fraguado es un periodo que inicia desde la mezcla de cemento con el agua en el que se produce una reacción química que genera un incremento de temperatura

denominado calor de hidratación. El proceso de fraguado da origen a la formación de compuestos de hidratación y sigue el proceso de endurecimiento del material donde se manifiesta el tiempo de fraguado final marcando el inicio de la resistencia mecánica del material.

Se determinó el tiempo de fraguado inicial y final para cada tipo de mortero haciendo uso del penetrómetro (marca HILSON Modelo HM-571 con agujas de 1", ½", ¼", 1/10", 1/20" y 1/40"). La figura 4 muestra morteros durante la prueba experimental de tiempo de fraguado. Los resultados obtenidos (tabla 2) demuestran que el tiempo de fraguado se incrementa gradualmente en los tres tipos de mortero estudiados.

Es interesante mencionar que durante las pruebas exploratorias en morteros de suelo-yeso y suelo-cal demostraron un tiempo de fraguado similar al tiempo de fraguado de mortero de suelo solo, sin embargo ambos morteros presentaron grietas originadas por retracción plástica y por secado. Características indeseables para su aplicación en andenes.



Figura 4. Prueba de fraguado en mortero de concreto con penetrómetro y aguja 1/40".

Tabla 2. Resumen de prueba de fraguado final e inicial en morteros: cemento-arena, suelo-cemento y suelo o barro

MORTEROS	Tiempo fraguado inicial	Tiempo fraguado final
Cemento-Arena	465 minutos 8 horas 20 minutos	675 minutos 11 horas 15 minutos
Suelo-Cemento	675 minutos 11 horas 15 minutos	3000 minutos 50 horas
Suelo	10,860 minutos 181 horas	15,150 minutos 252 horas y 30 minutos

2.3. Pruebas de sobrecarga

El método de cargas distribuidas en la superficie del relleno del andén se implementó para establecer la resistencia o capacidad portante. Las cargas se distribuyeron uniformemente a modo de generar esfuerzos de deflexión en el muro del andén y consiguiente falla. La sobrecarga se distribuyó paulatinamente sobre la plataforma del muro del andén con vigas de concreto de 65 kilogramos de peso cada una, hasta alcanzar un total de 1,100 Kilogramos en el que ocurrió la falla.

- Muro con mortero de suelo:** un sector del muro se experimentó con sobrecarga en estado seco, mientras que el otro sector en estado húmedo saturado con 80 litros de agua.
- Muro Seco:** el muro con mortero de suelo o barro se realizó en estado seco.
- Muro Húmedo:** riego gradual con agua sobre el muro con mortero de suelo hasta saturación (80 litros de agua) y sobrecarga consecuente con vigas de concreto sobre la plataforma del muro del andén.

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1. Tiempo de fraguado

Las pruebas para conocer las propiedades físico-mecánicas de los morteros deben incluir: el peso volumétrico seco, la caracterización del material, la composición química, medición del tiempo de fraguado y endurecimiento. Estos valores son determinantes en el diseño del material. En estado endurecido, la prueba de resistencia a compresión simple es el indicador del grado de reacción entre los componentes del mortero mezclados con agua. El resultado de esta prueba depende de factores como: buen amasado, colocado de piedras y curado del aglomerante. En la presente investigación se desarrolló la prueba de medición del tiempo de fraguado en mortero que demuestra la evolución de la resistencia en el tiempo.

El tiempo de fraguado final en morteros indica el cambio de estado plástico al estado endurecido, desde ese momento el mortero manifiesta su resistencia mecánica inicial. El mortero de barro evidenció mayor plasticidad que los otros morteros, con un tiempo de endurecimiento prolongado (tiempo de fraguado final = 252 horas y 30 min). El mortero de suelo-cemento durante el proceso constructivo demuestra trabajabilidad y viscosidad, su tiempo de fraguado final es menor que el del mortero de barro presumiblemente por la adición de cemento. El mortero de suelo-cemento endurece con mayor rapidez que los dos anteriores (11 horas y 15 min).

Dada la plasticidad del mortero de barro, este presentó agrietamiento por retracción plástica o sea por encogimiento del material durante el proceso constructivo de los modelos de laboratorio. En cambio, el mortero de cemento presentó endurecimiento rápido, una resistencia inicial más acelerada que los otros morteros, sin fisuras ni grietas por retracción plástica atribuidas al contenido de cemento. Pruebas preliminares con proporciones menores de suelo-cemento (con cemento al 5, 10 y 15%) evidenciaron

fisuración. La proporción de mortero 1:5 (suelo:cemento) presentó adicionalmente mayor dureza.

La disminución de la plasticidad de la arcilla debido a la adición de cemento Portland en el suelo mejoró las características mecánicas del mortero de suelo- cemento sin agrietamiento plástico y menor permeabilidad atribuible a la reacción química entre los compuestos químicos del cemento con los óxidos constituyentes del suelo en estado de hidratación.

Los compuestos químicos principales del cemento portland, silicato tricálcico $Ca_3 Si O_5$, silicato dicálcico $Ca_2 Si O_4$, aluminato tricálcico $Ca_3 Al_2 O_6$; aluminato ferrita tetracálcico $Ca_4 Al_2 F_2 O_{10}$ y los compuestos secundarios al mezclarse con el agua producen una reacción química formando silicatos cálcicos hidratados. Estudios previos han demostrado que bajo condiciones óptimas de humedad, la hidratación del cemento continúa y esto puede prolongarse por mucho tiempo, inclusive por años con incremento de su resistencia. El mortero suelo-cemento requerirá ser curado con agua para completar su hidratación durante la etapa de fraguado.

Dado que los muros con mortero de cemento investigados permanecieron expuestos a la intemperie, recibieron el curado natural a través de la lluvia. Es recomendable realizar los trabajos de construcción y rehabilitación de muros de andén a inicios o al final de época de lluvias (en Perú octubre a marzo). En temporada seca, los muros requerirán mayor frecuencia de mantenimiento, y sufrirán deterioro prematuro por presencia de grietas y separación del mortero con la piedra por retracción plástica y por secado afectando su estabilidad y resistencia mecánica, por las fuerzas naturales que tienden a recuperar el relieve natural de la ladera y otras fuerzas dinámicas como el paso de ganado sobre los andenes.

3.2. Sobrecarga en muros

El muro del andén es la estructura que da forma y soporte al andén. Este elemento estructural debe resistir la presión de los materiales de la plataforma, el trasdós y fuerzas externas actuantes. El valor del empuje activo del terreno sobre la estructura está condicionado por la altura del muro (H), peso específico del suelo, sobrecarga y cohesión del terreno, coeficiente de presión activa de la tierra de cada estrato de material acorde a las características físico-mecánicas, y el coeficiente de presión pasiva de tierras.

La estabilidad del muro seco al volcamiento está garantizada principalmente por la cimentación, mientras que la estabilidad al deslizamiento se mantiene gracias a la resistencia a la fricción entre los bloques de roca (Vallejo y Fontanese, 2014). Las piedras componentes de la cimentación deben ser de mayor tamaño, forma de paralelepípedos para mejor ensamble y peso específico alto. Además con una excavación del cimientado de profundidad al menos 50% superior a la del muro con mortero suelo-cemento.

La falla del muro del andén sucede al exceder la capacidad portante de la estructura por las fuerzas externas. Durante la prueba de sobrecarga en el sector de muro seco y el sector de muro saturado, se observó un comportamiento diferente del mortero de barro en los dos sectores de muro frente a la acción de fuerzas por sobrepeso de la plataforma del andén. Ambos sectores fueron construidos en las

mismas condiciones e iguales características, pero las condiciones de experimentación fueron determinantes, ya que el muro con mortero en estado seco mostró mayor capacidad portante que el muro con mortero saturado. En el muro seco se observó que el muro permanece estático y se observan la presencia de las grietas existentes antes del inicio de la prueba, atribuibles a la retracción del mortero por secado. En la figura 5 se muestra el muro seco con sobrecarga.

Las grietas (fisuras) en el muro seco por retracción plástica y secado son prácticamente inevitables e inherentes a la plasticidad del suelo. Estas grietas por retracción plástica se incrementan con la sobrecarga, en profundidad y separación por el asentamiento diferencial. Sin embargo, el muro permaneció en estado prácticamente estático lateralmente. A pesar de que las fisuras raramente afectan la resistencia o durabilidad de losas de concreto, las grietas en morteros facilitarían el paso del agua en época de lluvias saturando la estructura. Vale mencionar que la estabilidad mecánica de los andenes incas se debió en gran medida al excelente drenaje (e.g. Castro *et al.* 2018). La introducción de mortero suelo-cemento mejora su comportamiento mecánico sin embargo afectaría el drenaje. Un análisis detallado del comportamiento hidráulico del andén con mortero será preciso, en el que se diseñen elementos hidráulicos drenantes como tubos cribados o “lloronas” que alivien las presiones hidráulicas estáticas y minimicen la saturación.

En la prueba experimental en muro con mortero de barro en estado húmedo demostró deformaciones y presencia de grietas de manifestación frágil. Pandeo en la parte superior del muro en experimentación, a medida que se incrementaba el sobrepeso en la plataforma del muro (figura 6). Este comportamiento demuestra claramente la susceptibilidad del mortero de barro ante la presencia de agua que lo satura y rápidamente el suelo pierde su capacidad portante, se incrementan las grietas con el pasar de los días y el muro andén muestra un inminente peligro de derrumbe. Después de 45 días en observación las grietas mostraron mayor separación, se puede predecir que tendrá este comportamiento hasta su caída después de varios meses y retorno de la época de lluvias donde el exceso de lluvias penetrará por las grietas saturando la plataforma hasta el derrumbe del muro andén.



Figura 5. Experimentación por sobrecarga en la plataforma del andén.



Figura 6. a) Desprendimiento del mortero con las humedades pétreas en el muro de barro saturado y sobrecargado. b) Muestra el pandeo del muro de barro en la parte superior del muro y también se observan las grietas en el mortero.

Estudios previos sobre la utilización de suelo-cemento en albañilería para mampuestos con ladrillos crudos de suelo-cemento compactados con agua (Otero y Sandoval, 2004), construcción de bases y sub-bases con suelo-cemento en obras viales (Del Pino, 2011) (Gutiérrez Montes, 2010); ladrillos de suelo-cemento (Gatani, 2000) demuestran que la adición de cemento al suelo incrementa la resistencia mecánica y mejora sus características químicas y de servicio.

A diferencia de las investigaciones anteriores, este estudio propone la utilización de suelo-cemento con adición de pequeñas proporciones de cemento Portland por debajo del 20% en el material adherente entre los elementos pétreos del muro andén para extender su durabilidad y capacidad portante, mejorando su comportamiento frente a sollicitaciones de esfuerzos internos y externos, por ende prolongando la frecuencia de mantenimiento de rehabilitación del muro andén que redundará en la economía del poblador rural.

4. CONCLUSIONES

En el presente estudio se analizaron varios tipos de mortero como material adherente del muro del andén. Se observó que la adición de cemento portland a un suelo arcilloso estándar en pequeña proporción (1:5) permite lograr un material con adherencia incrementada entre piedras formando una estructura con capacidad portante superior. Los componentes básicos: silicatos y aluminatos

contenidos en el suelo reaccionan positivamente con los compuestos del cemento, estos son: el silicato tricálcico, silicato di cálcico, aluminato tricálcico y aluminato ferrita tetracálcico, resultando un material con mayor trabajabilidad en el proceso constructivo, tiempo de fraguado disminuido y menor plasticidad intrínseca en comparación a las arcillas.

El mortero de suelo-cemento no presenta agrietamiento por retracción, esta característica le hace menos susceptible a la incidencia del agua en el muro protegiéndolo de la erosión, manteniendo su capacidad portante y durabilidad. El muro seco, por otro lado, presenta gran estabilidad debido principalmente al peso de los elementos pétreos de mayor tamaño. Estos elementos reciben la mayor sollicitación de carga debido a que el peso incrementa drásticamente los esfuerzos resistentes (Vallejo y Fontanese, 2014). Además el muro seco no presenta grietas, dado que no cuenta con material adherente. Sin embargo, el proceso constructivo es altamente demandante en la topografía en que se emplazan los andenes que redundan en su desuso.

Debido al grado de abandono de los andenes en la actualidad, la rehabilitación y el mantenimiento de los andenes podría beneficiarse de la recolocación de rocas con mortero suelo-cemento en los elementos de mayor sollicitación mecánica, donde posiblemente se inició de falla. Sin embargo, en general la colocación de mortero necesariamente redundará en el drenaje de la estructura. El material drenante previene las presiones hidráulicas estáticas que podrían incrementar los esfuerzos y la estabilidad del muro del andén, por lo que un estudio del comportamiento hidráulico de la estructura con mortero será preciso.

5. RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento al proyecto de investigación “Estudio mecánico e hidráulico de elementos ecoingenieriles para la recuperación y mitigación de inundaciones en Cauces de ríos del valle del Cusco”, por la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, el Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica en Perú (CONCYTEC-Cienciactiva) y el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT), con Resolución de Dirección Ejecutiva No. 087-2017-FONDECYT-DE. Se reconoce la contribución en la parte experimental del ingeniero Ervin Huayllani Arones.

6. REFERENCIAS

- Ancajima, R. (2011). *Inventario Geofotográfico de la Hidráulica Preinca e Inca*. <https://hidraulicainca.com/2011/07/10/inventario-geofotografico-de-la-hidraulica-inca/>
- Berlingieri, R.R. (2017). *Caracterización de bloques de suelo cemento como mampuesto*. (BS thesis). Córdoba (Argentina): Universidad Nacional de Córdoba.
- Camino, G.A., y Zapata, A. (2018). *Inca's Ecoengineering Philosophy in the Design Conception of Flood Prevention Structures. Cusco Valley (Perú). 12th ISE 2018, Tokyo, Japan*.
- Castro, J., Vallejo, L.E., y Estrada, N. (2019). The optimal design of the retaining walls built by the Incas in their agricultural terraces. *Journal of Cultural Heritage*, 36, pp. 232-237. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.09.013>

Gatani, M.P. (2000). Ladrillos de suelo-cemento: mampuesto tradicional en base a un material sostenible. *Informes de la Construcción*, 51(466): pp.35-47. <https://doi.org/10.3989/ic.2000.v51.i466.713>

Gaviria, Y., y Nallive, O. (2012). *El bloque de suelo cemento (BSC) al bloque de suelo geopolimerizado (BSG)*. Maestría Tesis. Medellín: Escuela de Construcción, Universidad Nacional de Colombia.

Kendall, A. (2004). Restauración de canales y andenes agrícolas prehispánicos en los Andes usando tecnología tradicional y apropiada. En C.A. Llerena. M. Inbar y M.A. Benavides (eds.), *Conservación y Abandono de Andenes*. Lima: Universidad Agraria La Molina y Universidad de Haifa, pp. 98-106.

Kendall, A., y Rodríguez, A. (2015). Tecnología de la construcción de sistemas de andenería y el patrimonio vivo. En *Desarrollo y perspectivas de los sistemas de andenería de los Andes centrales del Perú*. Cuzco (Perú): Institut français, Centro de Estudios Regionales Andinos Bartolomé de Las Casas, pp. 75-125.

Molina, M. (2004). *Manejo de recursos hídricos y conservación de andenes en la comunidad de Aucará, Lucanas, Ayacucho, Perú*. En C.A. Llerena. M. Inbar y M.A. Benavides (eds.), *Conservación y Abandono de Andenes*. Lima: Universidad Agraria La Molina y Universidad de Haifa, pp. 107-110.

Otero, A.B., y Sandoval, F.J. (2004). Comportamiento de bloques de tierra comprimida sometidos a diferentes condiciones de humedad. *Actas del II Seminario Iberoamericano de Construcción con Tierra*. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, 18 y 19 de septiembre de 2003. Madrid: Mairela Libros.

Salas, D. (2004). Andes: agrosistema frágil. *II Congreso Internacional de Terrazas Cusco, Perú*. Mayo 2014.

Taboada, L., y Dolorier, R. (2004). Experiencia en la rehabilitación de andenes de la Agencia Santa Eulaalia del PRONAMA-CHCS, en San Juan de Iris, Huarochiri, Lima. En C.A. Llerena. M. Inbar y M.A. Benavides (eds.), *Conservación y Abandono de Andenes*. Lima: Universidad Agraria La Molina y Universidad de Haifa, pp. 158-165.

Vallejo, L.E., y Fontanese, M. (2014). Stability and Sustainability Analyses of the Retaining Walls Built by the Incas. *Geo-Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability* (pp. 3789-3798).

Wright, K.R., y Valencia Zegarra, A. (2000). *Machu Picchu: A Civil Engineering Marvel*. Reston, VA: American Society of Civil Engineering Press.