

Bioprotection of Slopes in Peru

Arnaldo Carrillo-Gil, Dr. Ing.,¹, Eduardo Carrillo, M.Sc.,² Leonardo Alcayhuaman, Dr. Ing.

¹ Universidad Ricardo Palma, Perú, acsac01@speedy.com.pe, lalcayhuaman@urp.edu.pe

Abstract– *This work is a part of a technological investigation evaluating the methods of erosion control on the slopes and unstable banks of the coast, mountains, and jungles in Peru using an economic and easy-to-build methodology. This methodology uses unskilled labor, local materials and plants, and minimal equipment. Solutions are discussed to prevent the movement of slopes in loose sands, mainly on the coast. Cases of solution in the mine tailings dams, which have failed or are abandoned, in the mountains at an elevation of more than 3,500 meters above the sea level are listed. This enables the detailed review of the problems of slope erosion in tropical soils and on the banks of the great Amazonian rivers, where there are severe landslides and constant degradation, caused by rain, as well as changes in river water levels during the corresponding flooding and dry seasons.*

Keywords– *erosion, slopes, biotechnology.*

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2017.1.1.46>

ISBN: 978-0-9993443-0-9

ISSN: 2414-6390

Bioprotección de taludes en el Perú

Arnaldo Carrillo-Gil, Dr. Ing.,¹ Eduardo Carrillo, M.Sc.,² Leonardo Alcayhuaman, Dr. Ing.

¹ Universidad Ricardo Palma, Perú, acsac01@speedy.com.pe, lalcayhuaman@urp.edu.pe

Resumen– El presente trabajo forma parte de una investigación tecnológica que evalúa métodos de control de erosión en taludes y laderas inestables de la costa, sierra y selva del Perú utilizando metodología económica, fácil de construir con equipo mínimo, uso de mano de obra no especializada, así como materiales y plantas del lugar. Se comentan soluciones para evitar el movimiento del talud en las arenas sueltas de la costa principalmente. Se enumeran los casos de solución en las presas de relave minero que han fallado o se encuentran en abandono en la sierra a una altura mayor de los 3,500 m.s.n.m.; para finalmente revisar con mayor detenimiento los problemas de erosión de los taludes en suelos tropicales y en las riberas de los grandes ríos amazónicos donde se presentan graves deslizamientos y degradación constante por efecto de la lluvia y del cambio de niveles del agua del río durante las épocas de avenidas y estiaje correspondientes

Palabras clave – erosión, taludes, biotecnología.

I. INTRODUCCIÓN

En la literatura actual de la ingeniería geotécnica se discuten con mucha más frecuencia y más profundidad los problemas de estabilidad de taludes y deslizamientos que los casos de erosión de suelos, sin tomar en cuenta que las consecuencias de la erosión en los proyectos de ingeniería pueden ser muy serias.

La importancia de la erosión de suelos generalmente es reconocida por los ingenieros geotécnicos, con frecuencia, en proyectos específicos donde se enfatizan las medidas para prevenir los efectos de la erosión. Sin embargo, probablemente no sea suficiente de considerar dichos problemas aisladamente, incluso puede ser desventajoso. Lo más deseable sería considerar la influencia de las obras de ingeniería civil en el medio ambiente y, en particular, la manera en que dichas obras pudieran acelerar la erosión de los suelos no solamente en sus inmediaciones sino también en las áreas circundantes.

Consideramos importante prestar atención a las formas o topografía del terreno, al tipo de suelos, a la vegetación existente, al porcentaje de precipitación pluvial y a la filtración del agua al subsuelo del área total que podría resultar afectada y que probablemente contribuya al desempeño eficiente de las instalaciones de ingeniería civil en un proyecto.

Por lo tanto, creemos que existe la urgente necesidad de que los ingenieros geotécnicos y los especialistas en conservación de suelos, agronomía e hidrología se unan, intercambien información acerca de métodos y técnicas de prevención y control de la erosión, y aprendan unos de otros acerca de las metas de investigación a largo plazo y los objetivos a corto plazo, uniendo sus recursos para beneficio de la ingeniería regional.

El juicio de ingeniería, con respecto a la erosión debe ejercerse después de aplicar tanto un proceso de análisis como

de síntesis y después de estudiar la gran variedad de factores geológicos, geomorfológicos y geotécnicos presentes, tomando en cuenta principalmente restituir las condiciones que prevalecieron antes de afectar la naturaleza con cortes inadecuados y con la destrucción de la vegetación existente en el lugar. Es por ello que ahora estamos ocupándonos de la bioprotección de los taludes y los avances que podríamos haber alcanzado en el Perú, en cada una de sus regionales naturales en que se encuentra dividido el país, esto es: costa, sierra y selva.

II. CONTROL HISTÓRICO DE LA EROSIÓN

El control de la erosión no es nuevo para el hemisferio occidental. El antiguo Imperio Incaico había dominado esta técnica necesaria, y sus construcciones, hasta hoy de pie después de miles de años, nos muestran claramente estos resultados. La prueba es la belleza y majestuosidad de Machu Picchu en el Perú.

En lo alto de los Andes peruanos, Machu Picchu fue construida aproximadamente en el año 1450 ADC como un Estado Real del emperador Pachacutec. Hoy es considerado como una joya arqueológica del mundo, el plan de estabilización de suelos ejecutado por los constructores incas hace 500 años fue objeto de un gran trabajo con la topografía natural.

El verdadero milagro de Machu Picchu no sólo es su espectacular ubicación y arquitectura especial, sino que con sus terrazas, o andenerías, se logró un completo control de la erosión y por lo tanto la estabilidad de los taludes. Se estima que alrededor de un 60% de los esfuerzos por lograr una construcción estable se dedicó a la preparación del sitio, a sus cimentaciones, al drenaje subterráneo y a la formación de las andenerías, hechos que han permitido que las fuerzas de la gravedad no causen graves asentamientos y deslizamientos que ya hubieran destruido la ciudadela.

Machu Picchu se encontró virtualmente intacta cuando fue descubierta en 1911, aunque antiguos lugareños la conocían desde hace mucho antes, por lo que es remarcable que la acción de la erosión fuera resistida adecuadamente dado a que la ciudadela estuvo sujeta a lluvia que supera los 2,000 mm por año durante cuatro siglos. Los constructores incas utilizaron criterios fundamentales para el control de la erosión que han sido probados con el tiempo: no dejar comenzar el fenómeno, controlarlo y no hacer cortes para desestabilizarlo, sólo disponer un adecuado sistema de drenaje superficial y profundo que permita que el agua originada por diferentes fuentes, sea lluvia, escorrentía, etc, discurra a través de la roca y el suelo sin causar daños permanentes y dar comienzo a la erosión. Los antiguos peruanos rendían culto al agua, que la

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2017.1.1.46>

ISBN: 978-0-9993443-0-9

ISSN: 2414-6390

15th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Global Partnerships for Development and Engineering Education”, 19-21 July 2017, Boca Raton – Florida, United States.

consideraban como una deidad sagrada, por ello encontramos numerosas evidencias en sus templos (Figura 1) y construcciones, pero además las salidas de agua detectadas formaban parte de un ingenioso sistema de drenaje superficial y profundo que llegaba hasta las andenerías o terrazas que fueron los elementos estabilizadores de los grandes taludes que encajaron en el medio ambiente paisajista de cada lugar tomando la forma de la tierra y sus curvas de nivel correspondientes. Se dice que: "... la apariencia total de Machu Picchu recuerda a una gran sabana dejada sobre el tope de la montaña para crear armonía entre la topografía escalonada y el Estado Real..." [1]. Entonces, el secreto de la estabilidad eterna de las terrazas agrícolas que se muestran intactas y libres de erosión después de siglos de recibir fuertes lluvias y sin mantenimiento, descansa en el adecuado control de la erosión, que se hacía evitando la infiltración de la lluvia y estableciendo rutas de flujo superficiales cuando ocurrían las grandes tormentas en el sitio, colocando capas de grava y suelos selecto que hacían de filtro para permitir una vía altamente permeable al flujo para así transportar el agua dentro de la roca y del suelo sin causar daño y controlar la napa freática [2]



Fig. 1 Salida de agua en un Muro Incaico de Machu Picchu

III. CONTROL ACTUAL DE LA EROSIÓN

Uno de los aspectos importantes para el control de la erosión es el empleo de la estabilización biotecnológica que se caracteriza por el uso combinado o integrado de vegetación viva con estructuras de contención y revestimientos. Las raíces y los tallos de las plantas, sirven como parte de los elementos estructurales y mecanismos principales en el sistema de protección de taludes.

Todos sabemos que la estabilización biotecnológica del suelo actualmente es muy reconocida por las ventajas y beneficios que la vegetación confiere para el control de deterioro y protección de taludes. El valor de la vegetación en la ingeniería civil y el papel de la revegetación consistente para estabilizar taludes ha dado muy buenos resultados prácticos y económicos.

La revegetación y rehabilitación de taludes con bioprotección en el Perú, está siendo utilizada con muy buenos resultados [3]. Actualmente estamos desarrollando una serie de programas experimentales con especialistas multidisciplinarios que en algunos casos han sido incluidos en el desarrollo de proyectos de ingeniería civil para controlar deslizamientos potenciales en las tres regiones naturales del país, esto es, la costa que se encuentra al nivel del mar, la sierra que llega hasta los 4,500 m.s.n.m., y la selva que ocupa las dos terceras partes del territorio peruano y se ubica a niveles entre los 400 a 1,000 m.s.n.m.

A continuación comentamos algunos casos ocurridos en las tres regiones.

IV. BIOPROTECCIÓN EN LA COSTA PERUANA

A. Carretera Panamericana Norte– Sector Pasamayo

La caída de arena en diversos sectores del Cerro Pasamayo, lugar cercano a la ciudad de Lima, ocasiona múltiples dificultades en el tránsito de vehículos pesados en la vía inferior principalmente y problemas de costosa conservación en la parte alta por donde se desarrolla la Variante Pasamayo para vehículos ligeros de mayor velocidad.

Los taludes tienen altura importante y están conformados por arena suelta tal como se muestra en la Figura 2.

La parte baja de este lugar ha sido objeto de numerosos estudios para estabilizar los grandes taludes de arena, sin embargo, hasta ahora no se ha logrado una solución definitiva, tomándose como una alternativa el uso de vegetación entre otras.

Para controlar la erosión eólica se ha experimentado con un grupo de plantas nativas del género *Tillandsia* de la familia de las Bromeliaceae que forma grandes comunidades espontáneas principalmente en la costa. Algunas especies se adaptaron perfectamente al clima particular del sitio, caracterizado por su aridez y presencia de neblina durante el invierno y parte del verano. Estas plantas carecen de raíces y sus funciones de absorción se realizan a través de la superficie de sus hojas.

La adaptación de estas plantas a las condiciones ecológicas del sitio y su capacidad para fijar la arena de los taludes ha sido considerada teniendo en cuenta que en otros lugares del país, crecen y fijan la arena en condiciones naturales sobre dunas de costa, con proximidad al mar, y humedad atmosférica crítica.



Fig. 2 Taludes de arena inestable en el Cerro Pasamayo

El género *Tillandsia* es exclusivamente americano. Se conocen cerca de 400 especies que habitan en las regiones tropicales y subtropicales. Son hierbas cualescentes, de hojas arrosetadas o fasciculadas más o menos triangulares y enteras. Después de plantar estos vegetales directamente sobre la arena, en condiciones naturales sin efectuar tratamiento alguno, se estableció que las plantas de *Tillandsia latifolia* se han conservado lozanas no obstante las altas temperaturas del verano, y que muchas de ellas han producido brotes axilares, eflorescencias y plantas nuevas. En contraposición, las *Tillandsias* purpura no dieron resultado, probablemente por falta de agua suficiente para su desarrollo.

En la parte alta, el objetivo principal es evitar el constante arenamiento en la plataforma de la autopista, generado en los meses de verano por el desplazamiento de masas de aire caliente y frío las que arrastran arena y la depositan en la vía, causando accidentes y demandando un costo significativo de mantenimiento. El establecimiento de plantaciones forestales al margen de la carretera, favorece la disminución de cambios bruscos de temperatura y por consiguiente evita los desplazamientos de la arena.

En uno de los proyectos se han instalado 50 hectáreas plantadas con tara, molle costeño, molle serrano, algarrobo, melia y huaranguillo (125,000 plantas), con una sobrevivencia del 80%, lo que indica un buen prendimiento y un buen comportamiento de estas especies en las dunas del desierto costeño. Luego de transcurrido 3 años y ocho meses de

instaladas las plantaciones, se observan ciertos cambios positivos en el aspecto paisajista, notándose la presencia de cobertura vegetal, así como la afluencia de fauna silvestre.

B. Taludes de la Costa Verde

Otro problema importante que tenemos en la misma ciudad de Lima, es la estabilización y protección de los taludes del litoral en el sector denominado Costa Verde, zona recreacional de la urbe que bordea las playas y zonas residenciales de varios distritos. En este lugar también se han practicado diversas soluciones, empleándose entre ellas la bioprotección por medio de plantas rastreras (Figura 3).



Fig. 3 Taludes con bioprotección de plantas rastreras



Fig. 4 La Campanilla cubre el talud como una red y tiene tallos hasta de 40 m de largo

Entre las plantas mejor utilizadas encontramos a la Campanilla (*Ipomoea Campanulata*), género muy extendido con al menos cuatrocientas especies en las regiones cálidas de ambos hemisferios. Los colores son brillantes y su gama abarca el blanco, el azul, el rojo, el púrpura, y diversas tonalidades de los mismos. Entre sus características

mencionamos: Tipo de terreno: sin requisitos particulares; es muy adecuada la tierra normal de jardín. Humedad: riego frecuente diariamente en verano, pero no demasiado abundante. Es resistente a la salinidad del mar. El tallo alcanza 40 a 60 metros y tiene un metro de profundidad formando una red vegetal. El riego se puede hacer por goteo y atrapa nieblas lo que favorece que los taludes no se dañen y se evitan los deslizamientos por exceso de agua (Figura 4).

Estas plantas rastreas tienen la ventaja de formar una red natural de protección que no permite la caída de rocas, gravas o materiales contundentes que han originado graves accidentes en varias oportunidades, además de dar un aspecto paisajista al lugar, mantienen flores todo el año, no la afecta la brisa salina del mar adyacente, pero en algunos casos han favorecido la procreación de roedores, dando como resultado el colapso del sistema de riego [4].

También se han ensayado metodologías modernas como la Hidrosiembra, que consiste en rociar por medio de un equipo especial una emulsión que contiene aglutinantes, hidroabsorbentes, nutrientes, semillas y agua que al mezclarse todos estos ingredientes favorecen la germinación de las semillas. Recientemente se han utilizado también geosintéticos cuyos resultados aún se encuentran en evaluación dado a su costo alto debido a que los insumos son importados y necesitan el uso de equipo especial para su instalación.

V. BIOPROTECCIÓN EN LA SIERRA PERUANA

La actividad minera genera sustancias de desecho, desmonte y relaves. Estos, en grandes volúmenes, son depositados formando pilas y taludes que además de producir contaminación originan graves problemas a las poblaciones vecinas, ya que se produce arrastre de las partículas finas por efecto del viento, que es necesario corregir por medio de revegetación, además de su incorporación al proceso productivo del ecosistema, restituyendo el paisaje natural del entorno.

El problema se presenta debido a que existen experiencias sobre revegetación en otros países, pero éstos tienen características climáticas y ecológicas completamente diferentes a las que se presentan en el Perú, por ello la restauración de áreas andinas degradadas por medio del sembrío de plantas debe hacerse utilizando vegetales propios del lugar, sobre todo debido a que la minería peruana se desarrolla a alturas por encima de los 3,000 metros sobre el nivel del mar.

La experiencia lograda, tomando en cuenta diferentes altitudes, bajas temperaturas, suelos pobres o plantación sobre relave en muchos casos han dado resultados prometedores. Así tenemos que entre las especies forestales de la sierra alta, cuatro de ellas mostraron buen potencial de adaptación a los 3,800 metros de altura, y de éstas sólo dos sobrevivieron o crecieron alentadoramente a los 4,200 m.s.n.m. (Figura 5).

Por otro lado, con respecto a la estabilización vegetal de relaves destaca por su alta sobrevivencia, crecimiento y producción de biomasa el C'olle (*Buddleia coricea*) lográndose que en diez meses tuviera un incremento de altura hasta de 60 centímetros, sin tomar en cuenta los fertilizantes que no mostraron tener efecto en el crecimiento de estas plantas, pues parece ser la especie más eficiente para la incorporación de materia orgánica en el relave.



Fig. 5 Revegetación sobre relaves de minas.

De todos los pastos sembrados sobre relaves, la avena nativa, la alfalfa moapa (*Medicago sativa*), la *Festuca dolichophylla* y el *Calamagrostis vicunarum*: sembradas en asociación con los tréboles mostraron buena germinación, posiblemente por el efecto de las bajas temperaturas, en cambio la asociación del pasto ovillo (*Dactylis glomerata*) con el Rye grass inglés (gramínea) y el trébol rojo (leguminosa) resultó ser la mejor alternativa para ser sembrados a los 4,200 m.s.n.m.

VI. BIOPROTECCIÓN EN LA SELVA PERUANA

La región donde mejores resultados hemos obtenido es la de la selva, pues las soluciones propuestas para los proyectos han sido instrumentadas con el fin de determinar comportamiento de la estabilidad del talud y su protección, tanto en las riberas del Río Amazonas cuanto en la selva virgen donde los caminos de inspección de los campos de petróleo y la intensa lluvia han originado erosión importante produciendo deslizamientos y degradación de los taludes.

Una de las áreas investigadas se encuentra en la cuenca sedimentaria del Río Marañón perteneciente a la Región

Subandina, al este del Río Corrientes, de topografía alta, semi-accidentada (Terciario), no inundable, caracterizada por colinas onduladas de pendiente moderada, y suelos saprolíticos arcillo-limosos muy plásticos y húmedos.

La precipitación promedio anual en la zona oscila entre 2,770 mm a 2,820 mm de acuerdo a las Isoyetas de la cuenca del Río Tigre. Las lluvias intensas pueden durar 8 horas o más de manera continua. El mayor período de lluvias se presenta entre Enero y Julio, mientras que el menor período de lluvias aparece entre Agosto y Diciembre.

Los suelos de la selva baja peruana son, en esencia, productos de una meteorización climática (humedad y temperatura). La composición química y las características morfológicas de estos productos, están influenciados por el grado de meteorización al cual ha sido sometido el material madre.

Sí se establece que los coeficientes de seguridad para el talud en estudio son aceptables, se considera que el problema es de erosión del talud por efecto de la lluvia intensa que se presenta en el lugar, (Figura 6) por lo tanto el diseño debe orientarse preferentemente a la protección del talud y su recuperación evitando los daños por erosión [5].



Fig. 6 Talud totalmente erosionado por efecto de la lluvia intensa

La bioprotección practicada considera que la vegetación contribuye a controlar los fenómenos originados por la deforestación que causa deslizamientos y erosión en los taludes, interceptando y disminuyendo la capacidad erosiva de la lluvia y reduciendo la velocidad del agua de escorrentía. Por ello, se ensayó una protección adecuada sobre la base de grama silvestre del lugar (Torourco) sembrada sobre una capa de suelo vegetal apropiadamente preparada y abonada para cultivo, de acuerdo a las condiciones de drenaje superficial del sitio, se ha previsto colocar sistemas que eviten los efectos de la erosión del suelo (Figura 7).



Fig. 7 Grama Torourco utilizada como bioprotección de taludes en suelos saprolíticos

La cobertura de taludes con vegetación es muy conveniente en el lugar y se puede realizar empleando varios sistemas que producen resultados esperados según el tipo de suelo, el grado de erosión, la inclinación de la pendiente y las condiciones climatológicas, dado a que la vegetación colabora eficazmente a controlar la erosión de los taludes y deslizamientos superficiales. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que su acción es limitada y que en muchos lugares es indispensable adoptar soluciones donde se combinen diversos tipos de estructuras de contención y obras de drenaje con la vegetación, para lograr los mejores resultados. Es por esto que, hemos hecho variar la pendiente, para el tramo bioprotegido, desde 1H :1V hasta 1V : 2.5 H, para tratar de poner al talud con la misma pendiente del suelo natural no degradado adyacente al talud rehabilitado (Figura 8).

Paralelamente, para evitar que la tierra de cultivo y la vegetación se movilen por el efecto lubricante del agua de lluvia, se colocó un sistema de soporte construido con troncos de madera dura de diámetro mínimo 3" sostenidos por medio de estacas. La vegetación se trasplantó trasladando bloques precortados vivos de la grama silvestre del lugar (torourco), hacia la zona del talud a proteger cuyo terreno fuera previamente preparado para el resembrado de esta cobertura vegetal. El espesor mínimo del bloque a trasplantar fue 5 centímetros, manteniendo intactas sus raíces así como evitar cualquier daño a la planta durante su traslado. Se recomienda que de preferencia los metros cuadrados de plantas extraídas del área natural escogida sean resembrados el mismo día en la zona respectiva (Figura 9).



Fig. 8 Protección del talud con torourco en la selva peruana



Fig. 9 Bioprotección combinada con drenaje y muros flexibles.

Los resultados obtenidos dieron un 100% de eficacia al sistema empleado y sus costos son muy bajos en comparación a otras soluciones practicadas en lugares similares.

VII. FUTUROS DESARROLLOS DE LA BIOPROTECCIÓN

Actualmente se dispone de una gran variedad de métodos de estabilización biotecnológica que hacen uso de materiales vivos, específicamente de vegetación, para el control del deterioro y protección de taludes. La protección biotecnológica y control de la erosión de taludes integra el uso de plantas y estructuras rígidas o flexibles, constituyendo lo que se llama “métodos de construcción mixta” en la que en muchos casos intervienen también los gaviones y los revestimientos con bloques articulados combinados con geomembranas adecuadamente dispuestas. También se están utilizando los métodos de suelos y bioingeniería para prevenir y controlar la erosión superficial, algunos con resultados bastante satisfactorios, utilizando las raíces y tallos como

elementos estructurales. Los pastos silvestres reforzados han dado buenos resultados contra la erosión del suelo originada por la velocidad del agua que fluye superficialmente, lográndose colocar refuerzos de cobertura bidimensional y geosintéticos de soporte tridimensional. La gran variedad y combinación de materiales proporcionan diversas soluciones para funciones específicas y condiciones especiales que plantea cada problema combinados con la vegetación natural (Figura 10).



Fig. 10 Combinación de muros flexibles, drenaje superficial y profundo y protección vegetal practicado con muy buenos resultados en la selva peruana

El uso de organismos biológicos para la estabilización biotecnológica propone también nuevos retos en la tarea de lograr utilizar racional y productivamente la naturaleza en la ingeniería civil.

VIII. COMENTARIOS FINALES

Las técnicas de la protección de taludes en Perú, desde tiempos ancestrales [6] ha estado orientada al drenaje y a la bioprotección y han tenido, tienen y tendrán siempre avances muy dinámicos con nuevos adelantos y desarrollos que ampliarán el rango de opciones y posibilidades al combinar materiales de construcción inertes bien drenados y protegidos con la vegetación viviente que preserve adecuadamente los taludes de la erosión.

REFERENCIAS

- [1]K. R. Wright and A. Z. Valencia, “Machu Picchu a Civil Engineering Marvel,” (2000) ASCE PRESS, USA.
- [2]A. Carrillo, “Geotechnical Technology in ancient Peruvian foundations”, XIII ICSFE, New Delhi, India, 1994.
- [3]AC Ingenieros Consultores SAC, “Proyecto y Supervisión de taludes en la Ribera Norte del Río Amazonas”, Iquitos, Perú, 2013
- [4]A.Carrillo, “Soluciones para la estabilidad de los taludes en la Costa Verde” CONSTRUIR, Nro. 21,Perú, 2015
- [5]AC Ingenieros Consultores SAC, “Proyecto de Recuperacion de Taludes”, Pabayacu, Perú, 2000
- [6] A. Alcayhuaman, “La ingeniería civil de los incas y la ingeniería del presente”, EL INGENIERO CIVIL, Nro. 48, Perú, 2012