

EL SISTEMA VETIVER PARA LA PREVENCIÓN Y EL TRATAMIENTO DE TIERRAS Y AGUAS CONTAMINADAS

Paul Truong

Director de la Red Internacional del Vetiver TVNI
Coordinador TVNI Asia y Oceanía
Consultoría Veticon, Brisbane, Queensland, Australia
Email: <Truong@uqconnect.net>

Resumen

El Sistema Vetiver (SV), que se basa en las aplicaciones de Pasto Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*, Roberty L.), fue investigado y desarrollado por la Red Internacional de Vetiver (TVNI) como una herramienta de protección del medio ambiente. La aplicación del SV para la protección del medio ambiente representa una tecnología de fitorremediación nueva e innovadoras. El SV se está utilizando en más de 100 países tropicales y subtropicales en Australia, Asia, África y América Latina para el tratamiento y disposición de aguas residuales contaminadas, residuos de la minería y de las tierras contaminadas debido a que es un método natural de gran eficacia y bajo costo en la protección del medio ambiente.

La amplia investigación y desarrollo-I&D en Australia, China y Tailandia en los últimos 20 años ha establecido que el pasto vetiver no es invasor, tiene una alta capacidad de absorción de agua y nutrientes, y se desarrolla bajo las condiciones climáticas y de suelo más adversas. El pasto vetiver es tolerante a niveles elevados y a veces tóxicos de salinidad, acidez, alcalinidad, sodicidad, así como a una amplia gama de metales pesados y agroquímicos. Las últimas investigaciones también muestran su excepcional capacidad de absorber y de tolerar niveles extremos de nutrientes, es capaz de consumir grandes cantidades de agua bajo altas condiciones de humedad y de producir un crecimiento masivo.

Es una tecnología verde y respetuosa del medio ambiente para el tratamiento de aguas, así como un método de reciclaje natural. Su producto final tiene varios usos, incluyendo alimentos preparados para animales, artesanías, y materiales para la agricultura ecológica. Debido a sus extraordinarias características morfológicas y fisiológicas, el vetiver también ha sido utilizado con éxito para la rehabilitación de los desechos de las minas de bauxita carbón, oro, plomo, zinc, cobre, bentonita, y para la fitorremediación de tierras muy contaminadas y de los residuos sólidos industriales en Australia, Chile, China, Sudáfrica, Tailandia y Venezuela.

Palabras claves: pasto vetiver, lixiviados, aguas residuales, desechos de minería, tierras contaminadas, metales pesados,

1.0 INTRODUCCIÓN

El Sistema Vetiver (SV), que se basa en la aplicación de pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*, Roberty L), fue desarrollado por el Banco Mundial para la conservación del suelo y del agua en la India en la década de 1980. La investigación y el desarrollo-I&D adicional de la Red Internacional de Vetiver (TVNI) en los últimos 20 años ha establecido al SV como una tecnología de fitorremediación innovadora en el tratamiento y disposición de aguas residuales contaminadas, residuos de la minería y de las tierras contaminadas debido a que es un método eficaz y de bajo costo en la protección del medio ambiente.

El SV se está utilizando en más de 100 países tropicales y subtropicales en Australia, Asia, África y América Latina como método natural para el tratamiento y disposición de aguas residuales contaminadas por descargas domésticas e industriales debido a su eficacia y bajo costo.

La amplia investigación y desarrollo-I&D en Australia, China, Tailandia y recientemente en Venezuela ha establecido que el pasto vetiver no es invasor, tiene una alta capacidad de absorción de agua y nutrientes y se desarrolla bajo las condiciones climáticas y del suelo más adversas. El pasto vetiver es tolerante a niveles elevados y a veces tóxicos de salinidad, acidez, alcalinidad, sodicidad, así como a una amplia gama de metales pesados y agroquímicos. Las últimas investigaciones también muestran su excepcional capacidad de absorber y de tolerar niveles extremos de nutrientes, es capaz de consumir grandes cantidades de agua bajo altas condiciones de humedad y de producir un crecimiento masivo.

Es una tecnología verde y respetuosa del medio ambiente para el tratamiento de aguas, así como un método de reciclaje natural. Su producto final tiene varios usos, incluyendo alimentos preparados para animales, artículos de artesanía, los biocombustibles y abono verde para la agricultura ecológica.

Por estas razones, el pasto vetiver es conocido como el pasto maravilla, el pasto milagroso o el pasto mágico en diversas partes del mundo. Las dos principales aplicaciones del SV para la Protección Ambiental son:

- La prevención, disposición y tratamiento de aguas residuales.
- Rehabilitación y tratamiento de suelos contaminados

2.0 CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DEL PASTO VETIVER. (Truong y col. 2008)

- **Tallos altos, firmes y erguidos**, que pueden crecer hasta 3 metros en condiciones favorables
- **Forma una barrera viva gruesa y porosa**. Cuando se planta a corta distancia forma una barrera porosa que retarda y dispersa el flujo de agua y actúa como un filtro muy eficaz, capturando tanto los sedimentos finos como los gruesos en el agua de escorrentía
- **Sistema de raíces profundo y compacto**. El pasto vetiver tiene un sistema radicular profundo y compacto, que es de naturaleza vertical y puede profundizar de dos a tres metros en el primer año, llegando a alcanzar hasta cinco metros en condiciones tropicales. La profundidad de la estructura de la raíz proporciona a la planta una gran tolerancia a la sequía, permite una excelente infiltración del agua en el suelo y es capaz de penetrar a través de capas de suelo endurecidas (duripan) y reducir / eliminar el drenaje profundo.

- **Tolerancia a variaciones extremas de clima** como la sequía o la inmersión durante inundación por períodos prolongados, niveles de temperatura que van desde -14 ° C a 55 ° C y puede prosperar en rangos de precipitaciones que van desde 300 mm a 6000 mm anuales.
- **Capacidad para volver a crecer rápidamente** después de haber sido afectado por la sequía, heladas, incendios, salinidad y otras condiciones adversas cuando los efectos adversos se han eliminado.
- **Alta resistencia** a las plagas, enfermedades y el fuego
- **Muy tolerante al tráfico** y una alta presión de pastoreo ya que los nuevos brotes se desarrollan a partir de la corona bajo el nivel del suelo.
- **Potencial de enmalezamiento.** El Vetiver es una planta no agresiva, produce flores, pero no semillas, no se reproduce por estructuras aéreas ni subterráneas y debe establecerse de manera vegetativa mediante la división de la raíz (corona). Es imperativo que las plantas utilizadas con fines de protección del medio ambiente no se conviertan en una maleza en el entorno local. Una planta estéril como Vetiver es ideal para esta aplicación. El pasto vetiver se puede erradicar con facilidad, bien por aspersion con glifosato o desarraigándolo y secándolo

3.0 PREVENCIÓN, DISPOSICIÓN Y TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

3.1 Características especiales de pasto vetiver que lo hacen adecuado para el Tratamiento de Aguas Residuales

- **Muy tolerante** a suelos con alta acidez, alcalinidad, salinidad, sodicidad y magnesio
- **Muy tolerante** a Al, Mn, As, Cd, Cr, Ni, Pb, Hg, Se y Zn en el suelo (Truong y Baker, 1998), (Danh et al.2009).
- **Capaz de soportar aportes muy altos** de N (10 000KgN/ha/año) y P (1000KgN/ha/año) (Wagner et al., 2003).
- **Capaz de responder** a niveles muy altos de N (6 000KgN/ha/año)
- **Alta eficiencia en la absorción** de nutrientes disueltos en particular, N y P en aguas altamente contaminadas (Truong y Hart, 2001)
- **Alto nivel de tolerancia** a herbicidas y pesticidas como los herbicidas diurón y atrazina en concentraciones a niveles de hasta 2000 mg/L. (Cull et al. 2000)
- **El pasto vetiver es tanto un xerófita** (resistentes a la sequía debido a su sistema radicular profundo y extenso) **y una hidrófita** (plantas de los humedales debido a su bien desarrollada red de esclerénquima [aire celular]). El vetiver prospera en condiciones de hidroponía. (Truong y Hart, 2001),
- **Alta tasa de uso del agua.** En condiciones de humedales o de alto suministro de agua el vetiver puede utilizar más agua que otras plantas comunes de los humedales como *Typha spp*, (aproximadamente 7,5 veces más), *Phragmites australis* y *Schoenoplectus validus*. Bajo óptimas condiciones de crecimiento, una hectárea de vetiver potencialmente utilizaría 279KL/ha/día. (Cull et al. 2000)

3.2 Eficacia del pasto vetiver en el tratamiento del agua contaminada

Las últimas investigaciones también muestran su excepcional capacidad de absorber y tolerar niveles extremos de nutrientes (Wagner et al. 2003), al consumir grandes cantidades de agua durante el proceso de producir un crecimiento masivo, de más de 100Mg/ha de biomasa (Truong y Smeal , 2003). Estos atributos indican que el vetiver es muy adecuado para el tratamiento de aguas residuales contaminadas de las industrias, así como de los vertidos domésticos.

3.3 La reducción o eliminación del volumen de aguas residuales

Para la reducción a gran escala o la eliminación total de las aguas residuales, los métodos vegetativos son el único método viable y factible disponible hasta la fecha. En el pasado, se han utilizado los árboles y especies de pastos para la disposición de aguas residuales en Australia, pero recientemente se ha encontrado que el vetiver es más eficaz que los árboles y otras especies de pastos en la disposición y tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios, y de los efluentes domésticos e industriales.

3.3.1 La eliminación de efluentes de pozos sépticos:

La primera aplicación del SV para la disposición de efluentes se llevó a cabo en Australia en 1996, y las pruebas posteriores demostraron que la plantación de cerca de 100 plantas de vetiver en un área de menos de 50m² había secado por completo la descarga de efluentes de unas instalaciones sanitarias en un parque, donde otras plantas de rápido crecimiento como los pastos tropicales, árboles, y cultivos como la caña de azúcar y el banano han fracasado (Truong y Hart, 2001). Los monitoreos del agua subterránea mostraron que después de pasar por cinco hileras de vetiver los niveles de N total se redujeron en un 99% (93 a 0,7 mg/L), P total en un 85% (de 1,3 a 0,2 mg/L), y coliformes fecales en un 95 % (500 a 23 organismos/100mL). Estos niveles están muy por debajo de los umbrales elaborados por la EPA australiana de N total <10 mg/L, P total <1 mg/L y E. coli <100 organismos/100mL

3.3.2 Disposición de los lixiviados de los relleno sanitarios:

La disposición de los lixiviados de los rellenos sanitarios son una gran preocupación para todas las grandes ciudades, ya que el lixiviado es a menudo altamente contaminados con metales pesados, contaminantes orgánicos e inorgánicos. En Australia y China, este problema puede ser resuelto mediante el riego de vetiver plantado en la parte superior del montículo del relleno sanitario y en la estabilización de los taludes de la presa de retención con los lixiviados recogidos en la parte inferior del relleno sanitario. Los resultados hasta la fecha han sido excelentes, el crecimiento fue tan fuerte que durante el período seco, los lixiviados no fueron suficientes para regar vetiver. Una plantación de 3.5ha ha dispuesto efectivamente de 4 ML al mes en verano y 2 ML al mes en invierno (Percy y Truong, 2005).

3.3.3 Disposición de aguas residuales industriales

La disposición de aguas residuales industriales está sujeta a las estrictas normas ambientales impuestas por la Autoridad de Protección Ambiental. El método más común de tratamiento de aguas residuales industriales en Queensland es por el riego de tierras, que se basa actualmente en plantas de pastos tropicales y subtropicales. Sin embargo, con una superficie disponible de tierras limitada para el riego, estas plantas no son suficientemente eficaces para disponer de forma sostenible de todos los

efluentes producidos por las industrias. Por lo tanto, para cumplir con las nuevas normas, la mayoría de las industrias están ahora bajo una fuerte presión para mejorar sus procesos de tratamiento mediante la adopción del SV como medio sostenible para la disposición de aguas residuales (Smeal et al, 2003).

3.4 Mejora de la Calidad de Aguas Residuales

La contaminación fuera de las instalaciones es la mayor amenaza para el medio ambiente mundial, este problema está muy extendido en los países industrializados, pero es particularmente grave en los países en desarrollo, que a menudo no tienen los recursos suficientes para hacer frente al problema. El método vegetativo es generalmente el más eficiente y de uso general para la mejora de la calidad del agua.

3.4.1 Captura de desechos, sedimentos y agroquímicos en las tierras agrícolas

En Australia, las investigaciones en plantaciones de caña de azúcar y de algodón han demostrado que las barreras de vetiver fueron altamente eficaces en la captura de nutrientes asociados con sedimentos tales como P, Ca y herbicidas como diuron, trifluralin, prometrin y fluometuron y biocidas como el α , β y sulfato endosulfán y cloropirifos, parathión y profenofos. Estos nutrientes y agroquímicos pueden ser retenidos en el sitio si las barreras de vetiver se establecen perpendicularmente en las líneas de los drenajes (Truong y cols. 2000)

En Tailandia, el experimento llevado a cabo en el Real Centro de Estudios para el Desarrollo Huai Sai, Provincia de Phetchaburi ha demostrado que las barreras de vetiver plantadas en contorno a través de la pendiente forman una represa viva, mientras que su sistema de raíces forma una barrera subterránea que evita que los residuos de biocidas disueltos por el agua y otras sustancias tóxicas fluyan hacia abajo a los cuerpos de agua subterráneos. La gruesa barrera justo por encima de la superficie del suelo también recoge partículas de desechos y del suelo a lo largo del curso de agua (Chomchalow, 2006).

3.4.2 Absorbiendo y tolerando contaminantes y metales pesados

La característica principal de SV en el tratamiento de la contaminación del agua reside en su capacidad de absorber rápidamente los nutrientes y metales pesados, y su tolerancia a niveles muy elevados de estos elementos. Aunque la concentración de estos elementos en las plantas de vetiver a menudo no es tan alta como en los de hiper-acumuladores, sin embargo debido a su rápido crecimiento y alto rendimiento (producción de materia seca hasta 100Mg/ha/año), el vetiver puede remover una cantidad mucho mayor de nutrientes y metales pesados de suelos contaminados que la mayoría de los hiper-acumuladores.

En Australia, se llevó a cabo un proyecto para demostrar y para obtener datos cuantitativos sobre el efecto de los SV en la reducción del volumen de efluentes y también la mejora de la calidad bajo condiciones de campo. En esta prueba cinco filas de vetiver fueron irrigadas subsuperficialmente con la descarga del efluente del tanque séptico. Dos conjuntos de pozos de monitoreo se instalaron, uno después de dos filas y un segundo después de cinco filas de vetiver. Después de cinco meses de crecimiento, los niveles totales de N en las muestras colectadas después de 2 filas se redujo en un 83% y después de 5 filas en un 99%. Asimismo, el total de los niveles de P se redujeron en un 82% y 85% respectivamente (Truong y Hart, 2001).

En Chile, el SV está siendo evaluado para el tratamiento de aguas residuales de una granja de cerdos de gran tamaño, cerca de Santiago. Este efluente tiene un contenido muy alto de N, P y metales pesados (Molina, 2010).

En China, la disposición de aguas residuales de granjas de ganadería intensiva es uno de los mayores problemas en zonas densamente pobladas ya que China es el país con la mayor cría de cerdos en el mundo. Los nutrientes y los metales pesados de las granjas de cerdos son las principales fuentes de contaminación del agua. Las aguas residuales de granjas de cerdo contienen niveles muy altos de N y P y también de Cu y Zn, que se utilizan como promotores del crecimiento en los piensos. Los resultados mostraron que el vetiver tenía una capacidad de depuración muy fuerte. Su relación de absorción y purificación de Cu y Zn fue del 90%, As y N > 75%; Pb fue entre 30% -71% y P fue de entre 15-58%. Los efectos purificadores del vetiver en los metales pesados, y N y P de una granja de cerdos fueron clasificados como Zn > Cu > As > N > Pb > Hg > P (Xuhui et al., 2003).

En Venezuela, el SV está siendo utilizado para la disposición de las aguas residuales de fábricas de cerveza y granjas de animales, así como la contaminación del agua en lagos y represas (O. Luque com. pers).

En Vietnam, el SV se utiliza para tratar las aguas residuales de una fábrica de procesamiento de alimentos del mar en el delta del Mekong. Se estableció una prueba de demostración para determinar el tiempo de retención requerido en el tratamiento de efluentes en el campo de vetiver para reducir las concentraciones de nitrato y de fosfato en los efluentes a niveles aceptables. El experimento comenzó cuando las plantas tenían 7 meses de edad. Las muestras de agua fueron tomadas para el análisis con un intervalo de 24 horas durante 3 días. Los resultados analíticos muestran que el contenido total de N en las aguas residuales se redujo en un 88% y 91% después de 48 y 72 horas de tratamiento, respectivamente. Mientras que el P total se redujo en un 80% y 82% después de 48 y 72 horas de tratamiento. La cantidad de N total y P removidos en los tratamientos de 48 y 72 horas no fueron significativamente diferentes (Luu et al, 2006).

3.4.3 Humedales

Los humedales naturales y artificiales han demostrado ser eficaces en la reducción de la cantidad de contaminantes en el escurrimiento de las tierras agrícolas e industriales. El uso de los humedales para la eliminación de contaminantes implica una compleja variedad de procesos biológicos, tales como las transformaciones en los procesos microbiológicos y físico-químicos, por ejemplo, adsorción, precipitación o sedimentación. El vetiver es eminentemente adecuado para su uso en franjas amortiguadoras o como especie de planta para humedales debido a sus características morfológicas y fisiológicas únicas (Cull et al 2000.)

En Australia, fue construido un humedal para tratar los efluentes de la salida del alcantarillado de una pequeña ciudad rural. El objetivo de este plan era reducir / eliminar los 500ML/día de efluentes producidos por esta pequeña ciudad antes de que el efluente se descargue a los cursos de agua. Los resultados hasta el momento ha sido excelente, los humedales de vetiver han absorbido todos los efluentes producidos por esta pequeña ciudad Cuadro 1. (Ash y Truong, 2003).

En China, los humedales se consideran el medio más eficaz para reducir el volumen y la alta carga de nutrientes de los efluentes de las granjas de cerdo. A los fines de determinar las plantas más adecuadas para el sistema de humedales, el vetiver fue seleccionado junto con otras 11 especies en este programa. Las mejores especies son vetiver, *Cyperus alternifolius* y *Cyperus exaltatus*. Sin embargo, pruebas adicionales mostraron que *Cyperus exaltatus* presentó marchitamiento y entro en dormancia durante el otoño y no rejuveneció hasta la próxima primavera. Se necesita crecimiento

completo durante todo el año para el tratamiento eficaz de aguas residuales. Por lo tanto vetiver y *Cyperus alternifolius* fueron las dos únicas plantas adecuadas para el tratamiento en los humedales de efluentes de la cría de cerdos (Liao, 2 000).

En Tailandia se ha realizado muy buena investigación en los últimos años sobre la aplicación de SV para el tratamiento de aguas residuales a diferentes escalas, en un humedal construido. En un estudio, tres ecotipos de vetiver ("Monto", "Surat Thani" y "Songkhla 3" se usaron para tratar las aguas residuales de una fábrica de molino de harina de tapioca. Se emplearon dos sistemas de tratamiento a saber: (I) las aguas residuales se mantienen durante dos semanas en un humedal de vetiver y luego se escurre, y (ii) se mantienen las aguas residuales en un humedal de vetiver por una semana y se dejan drenar de forma continua durante un total de 3 semanas. Se encontró que en ambos sistemas, el ecotipo "Monto" tuvo el mayor crecimiento de vástago, de raíz, y de la biomasa, y fue capaz de absorber los más altos niveles de P, K, Mn y Cu en el tallo y la raíz, Mg, Ca y Fe en la raíz, y Zn y N en el vástago. El ecotipo "Surat Thani" absorbió niveles de Mg más altos en el vástago y de Zn en la raíz, mientras que el ecotipo "Songkhla" absorbió niveles más altos de Fe, Ca, en el vástago, y el máximo de N en la raíz (Chomchalow, 2006).

Cuadro 1. Niveles de calidad del efluente antes y después del tratamiento con vetiver

<i>Indicadores</i>	Afluente fresco	Resultados 2002/03	Resultados 2004
PH (6.5 a 8.5)*	7.3 a 8.0	9.0 a 10.0	7.6 a 9.2
Oxígeno Disuelto (2.0 minimo)*	0 a 2 mg/L	12.5 a 20 mg/L	8.1 a 9.2 mg/L
DBO 5 Días (20 - 40 mg/l max)*	130 a 300 mg/L	29 a 70 mg/L	7 a 11 mg/L
Sólidos en suspension (30 - 60 mg/l max)*	200 a 500 mg/L	45 a 140 mg/L	11 a 16 mg/L
Nitrógeno Total (6.0 mg/l max) *	30 a 80 mg/L	13 a 20 mg/L	4.1 a 5.7 mg/L
Fósforo Total (3.0 mg/l max) *	10 a 20 mg/L	4.6 a 8.8 mg/L	1.4 a 3.3 mg/L

*Niveles requeridos.

3.5 Tendencia de futuro

Como la escasez de agua se avecina en todo el mundo, las aguas residuales deben ser consideradas más como un recurso que como un problema. **La tendencia actual consiste en reciclar las aguas residuales para uso doméstico e industrial**, en lugar de su eliminación. Por lo tanto, el potencial del SV es enorme como medio sencillo, higiénico y de bajo costo para el tratamiento y reciclado, de aguas residuales resultantes de actividades humanas.

El desarrollo más reciente y significativo sobre el uso del vetiver para el tratamiento de aguas residuales es el uso de camellones de suelo con plantas. En este nuevo tipo de aplicación, la calidad y la cantidad del agua de salida puede ser ajustada para cumplir con un estándar determinado. Este

sistema está ahora en fase de desarrollo y prueba en GELITA APA, Australia. Los detalles completos de este sistema se describen en Truong y Smeal (2003).

4.0 TRATAMIENTO DE TIERRAS CONTAMINADAS

En términos de protección del medio ambiente, los avances más significativos en los últimos 15 años son en primer lugar, la investigación que condujo al establecimiento de niveles de tolerancia de referencia del pasto vetiver a las condiciones adversas del suelo y por otra, su tolerancia a la toxicidad de metales pesados. Estos han abierto un nuevo campo de aplicación del SV: la rehabilitación de las tierras contaminadas y tóxicas.

4.1 Características especiales de pasto vetiver adecuadas para la rehabilitación de minas y tierras contaminadas

Además de los atributos generales que se especifican en 2.2 anteriormente, las siguientes son algunas de las características únicas del pasto vetiver que lo hacen especialmente adecuado para la rehabilitación de minas y de tierras contaminadas:

- La tolerancia a condiciones muy adversas: toxicidad por acidez y alcalinidad (pH entre 3.5 a 10.5), sodicidad, magnesio y aluminio, y a los suelos salinos
- La tolerancia a niveles muy altos de metales pesados como el As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se y Zn en el suelo.
- La mayoría de los metales pesados absorbidos permanecen en la raíz, por lo que se puede utilizar como forraje.
- Capacidad para volver a crecer rápidamente después de haber sido afectado por la sequía, heladas, incendios, salinidad y otras condiciones adversas cuando los efectos adversos se han eliminado.

4.2 La tolerancia a condiciones adversas

4.2.1 Tolerancia a niveles altos de acidez, aluminio y toxicidad por manganeso

Las investigaciones muestran que el crecimiento del vetiver no se ve afectado al suministrar fertilizantes con N y P, incluso en condiciones de acidez extremas (pH = 3.8) y con un alto nivel de porcentaje de saturación del suelo con Aluminio (68%). Mediciones en campo comprueban que el vetiver crece satisfactoriamente a pH=3.0 en el suelo y niveles de Aluminio entre 83-87%. Sin embargo, debido a que el vetiver no puede sobrevivir a niveles de saturación de Aluminio de 90% y pH = 2.0 en el suelo, su umbral de tolerancia está entre 68% y 90%. Esta tolerancia es excepcional, ya que la mayoría de las plantas se ven seriamente afectadas a niveles menores del 30%. Yendo más lejos, el crecimiento del vetiver permaneció inalterado cuando los niveles de manganeso extractable en el suelo alcanzaron 578 mg/Kg, el pH del suelo era tan bajo como 3.3, y el contenido de manganeso en la planta alcanzó 890 mg/Kg. Dada su alta tolerancia a la toxicidad por Al y Mn, el vetiver ha sido utilizado exitosamente para el control de la erosión en suelos sulfato ácidos con un pH alrededor de 3.5 y un pH oxidado tan bajo como 2.8 (Truong and Baker, 1998) Los resultados de la investigación demostraron que con los fertilizantes N y P, el crecimiento del vetiver no se vio afectada, incluso en condiciones muy ácidas (pH = 3.8) y en un nivel muy elevado de suelo de aluminio Porcentaje de Saturación (68-80%). Las pruebas de campo confirmaron más tarde que el vetiver creció satisfactoriamente en el suelo de pH = 3.0 y el nivel de aluminio entre 83 a 87%, lo

que es muy alta ya que el crecimiento de la mayoría de las plantas se ve afectado a nivel inferior al 30%. Además, el crecimiento del vetiver no se vio afectada cuando el manganeso extraíble en el suelo alcanzó 578 mg/Kg, el pH del suelo tan bajo como 3.3 y el contenido de manganeso de la planta era tan alta como 890mg/Kg. Como resultado de su nivel de tolerancia a la alta toxicidad de Al y Mn, vetiver ha sido utilizado con éxito para el control de la erosión en suelos ácidos con pH sulfato real del suelo alrededor de 3,5 y pH oxidado es tan baja como 2.8 (Truong y Baker, 1998).

4.2.2 Tolerancia a suelos salinos y sódicos

Dado el nivel umbral de salinidad de CEse = 8 dS/m, el vetiver se compara favorablemente con algunos de los cultivos y pastos más tolerantes de Australia, incluyendo el pasto Bermuda (*Cynodon dactylon*) con un umbral de salinidad de 6.9 dS/m; Pasto Rhodes (*Chloris gayana*) (7.0 dS/m); Pasto de trigo (*Thynopyron elongatum*) (7.5 dS/m) y cebada (*Hordeum vulgare*) (7.7 dS/m).

4.2.3 La tolerancia a los metales pesados

El cuadro 2 muestra que el vetiver es altamente tolerante a As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se y Zn.

Cuadro 2: Niveles umbrales de metales pesados en el crecimiento del vetiver en comparación con otras especies

Metales pesados	Niveles umbrales en el suelo (mgKg ⁻¹)(disponible)		Niveles umbrales en la planta (mgKg ⁻¹)	
	Vetiver	Otras plantas	Vetiver	Otras plantas
Arsénico	100-250	2.0	21-72	1-10
Cadmio	20-60	1.5	45-48	5-20
Cobre	50-100	No disponible	13-15	15
Cromo	200-600	No disponible	5-18	0.02-0.20
Plomo	>1 500	No disponible	>78	No disponible
Mercurio	>6	No disponible	>0.12	No disponible
Níquel	100	7-10	347	10-30
Selenio	>74	2-14	>11	No disponible
Zinc	>750	No disponible	880	No disponible

4.2.4 Distribución de metales pesados en la planta vetiver

La distribución de los metales pesados en el vetiver puede dividirse en tres grupos:

- Zn se distribuye casi parejo entre el vástago y la raíz (40%).
- Pequeñas cantidades de As, Cd, Cr y Hg absorbidos se translocaron al vástago (1%-5%).
- Moderadas cantidades de Cu, Pb, Ni y Se, se translocaron al vástago (16%-33%) (Truong, 2004).

4.3 Rehabilitación de residuos de Minas y fitorremediación

Debido a las extraordinarias características morfológicas y fisiológicas señaladas anteriormente, el pasto vetiver ha sido utilizado con éxito para la estabilización de laderas empinadas

y la fitorremediación de residuos mineros en Australia y otros países (Truong, 2004).

4.3.1 Australia

Escombreras de carbón: Fue establecido un ensayo para seleccionar las especies más adecuadas para la rehabilitación de 23 ha, 3,5 millones de metros cúbicos de escombreras de carbón en una laguna. El sustrato contenía altos niveles de magnesio soluble, de azufre y calcio, así como condición de salino, muy sódico y muy bajo contenido de nitrógeno y fósforo. Los niveles de cobre, zinc, magnesio y hierro disponible para las plantas también fueron elevados. Se utilizaron cinco especies tolerantes a la sal: vetiver, sofá marino (*Sporobolus virginicus*), carrizo o caña de río (*Phragmites australis*), enea (*Typha domingensis*) y *Sarcocornia spp.* La completa mortalidad se registró después de 210 días para todas las especies excepto vetiver y sofá marino. La supervivencia del vetiver se incrementó significativamente por acolchado (mulch), pero la aplicación de fertilizantes por sí mismo no tuvo ningún efecto. El mulch y la fertilización aumentaron el crecimiento del vetiver en 2 Mg/ha, que fue casi 10 veces superior al del sofá marino (Radloff et al, 1995).

Escombreras de oro frescas: las escombreras frescas son normalmente alcalinas (pH = 8.9), bajas en nutrientes y muy altas en sulfatos libres (830 mg/Kg), sodio y azufre total (1-4%). El vetiver se estableció y creció muy bien en estos residuos sin fertilizantes, pero el crecimiento se ha mejorado por la aplicación de 500 Kg/ha de PDA. El vetiver ha sido utilizado con éxito en un ensayo a gran escala para controlar el movimiento del polvo y la erosión del viento en un dique de colas de 300ha. Cuando se planta en hileras entre 10m y 20m de distancia, las barreras de vetiver redujeron la velocidad del viento y promovieron el establecimiento de pasto Rhodes (*Chloris gayana*).

Escombreras de oro viejas: Debido al alto contenido de azufre, las escombreras de minas de oro viejas son a menudo extremadamente ácidas (pH 2.5 a 3.5), con un alto contenido de metales pesados y bajas en nutrientes para las plantas. El restablecimiento de la vegetación en estos residuos es muy difícil, a menudo muy costoso, y la superficie de suelo desnudo es altamente erosionable. Se llevaron a cabo ensayos de campo en dos sitios de escombreras viejas (8 años). Uno exhibe una superficie blanda y el otro una capa crujiente dura. El sitio de superficie blanda tenía un pH de 3,6, sulfato 0,37% y el total de azufre 1,31%. El sitio de superficie dura tenía un pH de 2,7, sulfato 0,85% y el total de azufre 3,75%. Ambos sitios fueron bajos en nutrientes para las plantas (Cuadro 3). Cuando se aplicó un abastecimiento adecuado de los fertilizantes nitrógeno y fósforo (300Kg/ha PDA), se obtuvo un excelente crecimiento del vetiver en el sitio de superficie blanda (pH=3.6) sin ningún tipo de encalado. Sin embargo, la adición de 5 Mg/ha de cal agrícola mejoró significativamente el crecimiento del vetiver. En el sitio de superficie dura (pH=2.7), aunque el vetiver sobrevivió sin encalado, la adición de cal (20 Mg/ha) y fertilizante (500kg/ha PDA) mejoró en gran medida el crecimiento del vetiver (Truong, 2004).

Escombreras de bentonita: las escombreras de minas de bentonita son muy erosionables, ya que son altamente sódicas con porcentajes de sodio intercambiable (PSI) con valores que van desde 35% a 48%, altas en sulfato y extremadamente bajas en nutrientes para las plantas. La revegetación de las escombreras ha sido muy difícil, ya que las especies sembradas se lavan a menudo y son arrastradas lejos luego de las primeras lluvias, y las que quedan no pueden prosperar en esas duras condiciones. Con el suministro adecuado de fertilizantes con nitrógeno y fósforo el vetiver se estableció rápidamente en esas escombreras, en las que las barreras proveen control de la erosión y sedimentos, conservan la humedad del suelo y mejoran las condiciones de cama de siembra para el establecimiento de especies autóctonas.

Cuadro 3: Contenido de metales pesados en escombreras de minas de oro representativas en Australia.

Metales pesados	Contenidos totales (mgKg ⁻¹)	Niveles umbrales (mgKg ⁻¹)
Arsénico	1 120	20
Cromo	55	50
Cobre	156	60
Manganeso	2 000	500
Plomo	353	300
Estroncio	335	ND
Zinc	283	200

ND No disponible

4.3.2 Chile

Minas de cobre: La principal fuente de ingresos económicos de Chile se origina en la industria minera, principalmente de la minería del cobre. Por esta razón la Fundación Chile está llevando a cabo una serie de estudios piloto con el Sistema Vetiver para remediar los residuos producidos por la industria minera, lo que representa una importante fuente de contaminantes para el medio ambiente - agua, suelo y aire. Se crearon ensayos de demostración en varias minas de cobre en la región central para:

- Determinar si el vetiver puede crecer sobre las rocas altamente contaminadas de residuos de cobre y escombreras
- Averiguar si el vetiver puede crecer en estas condiciones climáticas extremas: a gran altitud, el invierno frío y húmedo, el verano muy caluroso y seco
- Cerciorarse de que el vetiver es eficaz en la estabilización de los taludes de lagunas de relaves (construida con material de relaves de cobre solamente) y de volcado de residuos de roca, y en controlar la erosión del viento y el agua
- Determinar si el vetiver es eficaz para prevenir la erosión del viento y del agua en las lagunas de residuos frescos y viejos.

Un año después de la siembra, los resultados hasta la fecha son muy alentadores; el vetiver pudo establecerse tanto en escombreras de cobre altamente contaminados como en residuos de volcado de roca, donde alcanzó 1,5 m en 6 meses. Un crecimiento razonable también se observó en un sitio de 3500m de altitud y, aunque las plantas fueron cubiertas por 50 cm de nieve durante un mes, han sobrevivido el invierno en este sitio (Fonseca et al, 2006). Una revisión reciente de este proyecto es presentado por Rocío Fonseca en esta conferencia.

4.3.3 China

Escombreras de minas: Se ha demostrado que *C. zizanioides* es una de las mejores opciones para la revegetación de escombreras en minas de Pb/Zn debido a su alta tolerancia a los metales, por otra parte, este pasto puede también ser utilizada para la fito-extracción, debido a su gran biomasa. La investigación reciente también sugiere que el vetiver también tiene mayor tolerancia al drenaje ácido de minas (DAM) de una mina de Pb/Zn, y que en los humedales plantados con este pasto se puede ajustar efectivamente el pH y eliminar SO₄²⁻, Cu, Cd, Pb, Zn y Mn de DAM. Por ejemplo, el vetiver produce más del doble de biomasa que el de las dos especies locales e introducidas utilizadas

en la rehabilitación de las minas de Pb y Zn de Lechang, donde los residuos contienen niveles muy altos de metales pesados (Pb en 3231mg/Kg, Zn en 3418 mg/Kg, Cu en 174 mg/Kg y Cd en 22 mg/Kg) (Shu, 2003).

4.3.4 África del Sur:

Escombreras de minas: De Beers realizó ensayos de rehabilitación de lodos en las lagunas en Sudáfrica en varios sitios, encontrando que el vetiver posee los atributos necesarios para el crecimiento autosostenible en los desechos de kimberlita alcalina, ya que contiene el escurrimiento, detiene la erosión y promueve la creación de un micro-hábitat ideal de para el establecimiento de especies de gramíneas autóctonas. El vetiver también ha sido utilizado con éxito en la rehabilitación de las minas de diamantes en la Premier y Koffiefonteine y lodos en presas en la mina de platino Anglo American en Rastenburg y el Velkom, mina de oro de la marca Presidente. (Tantum pers.com.).

4.3.5 Tailandia

Escombreras de minas: Roongtanakia et al (2008) informan que el vetiver puede crecer bien en desechos de minería de plomo. La aplicación de compost o fertilizante químico da como resultado un mejor crecimiento en altura y el peso seco que sin fertilizantes, pero no aumentó la concentración de plomo en la planta de vetiver. La mayor concentración se encuentra en la raíz en relación con el vástago.

4.3.6 Venezuela

Mina de bauxita: La mina de bauxita, CVG Bauxilum, ubicada en Los Pijiguaos, estado Bolívar, incorporó SV en su política general para mitigar el impacto de las actividades mineras en la comunidad local con el objetivo de prestar asistencia social y desarrollo económico a las personas de la región. El sistema de vetiver se ha utilizado en este proyecto, para la estabilización de diversos gradientes de pendientes, en la interface suelo-cemento para proteger las infraestructuras en el sitio de la mina, la estabilización de cárcavas y bordes de drenajes, refuerzo de los diques de las lagunas, biofiltro en cárcavas y alrededor de lagunas. Para el control de la erosión, se han plantado un total de 26300 metros de barreras de vetiver, desde el 2003 a junio de 2006. Ahora CVG Bauxilum está planeando plantar otros 7400 metros de barreras de Vetiver.

Con base en los resultados anteriores, durante los últimos tres años, CVG Bauxilum ha adoptado con éxito el Sistema Vetiver para la rehabilitación de tierras y protección del medio ambiente para restaurar esta mina de bauxita a cielo abierto en Venezuela, y llevar a un nivel deseable el medio ambiente. (Luque et al 2006;. Lisena et al 2006).

4.4 Rehabilitación de tierras contaminadas y fitorremediación

Los residuos industriales contienen niveles muy altos tanto de compuestos orgánicos como inorgánicos, los cuales han sido tratados con éxito en Australia, China, India, Tailandia y Vietnam.

En Australia, el pasto vetiver fue utilizado con éxito para la rehabilitación de un antiguo vertedero de residuos en una gran fábrica de explosivos contaminados con N, como se muestra a continuación:

- Volumen de suelo contaminado: Aproximadamente 6990m³
- El total de volumen de suelo contaminado: 71120 m³

- Niveles de amoníaco del suelo, que van desde 20 hasta 1220mg/kg, con un promedio de 620mg/kg
- N total del suelo superficial, que van desde 31 hasta 5380mg/kg, un promedio de 2700 mg/kg
- Nivel de amonio en el agua, desde 235 a 1150 mg/L, con una muestra en 12500 mg / L

En base a los niveles promedio de NH₃ y N total, el contenido total de N de la capa superficial del suelo (20 cm de profundidad) es de 0.66kgN/m², lo que equivale a 6600kgN/ha. La investigación con Vetiver ha demostrado que el vetiver bajo unas condiciones de humedad óptimas se puede cultivar en suelos con aplicaciones de hasta 8000kgN/ha (Wagner et al 2003, que se adjunta). Por lo tanto, se prevé que la mayor parte del N en el relleno será removido por el vetiver en menos de 4 años, bajo unas condiciones atmosféricas favorables y un máximo de 6 años bajo condiciones atmosféricas normales. Un crecimiento vigoroso que ha producido muy alta biomasa en los últimos años, con alto contenido de N, indica que esta proyección está en curso.

5.0 VENTAJAS GENERALES DE USO DEL SISTEMA VETIVER

Simplicidad, bajo costo y poco mantenimiento son las principales ventajas de SV sobre los métodos químicos y de ingeniería para los tratamientos de las aguas y de las tierras contaminadas.

5.1 Simplicidad

La aplicación del Sistema Vetiver es bastante simple comparado con otros métodos convencionales. Además de un diseño adecuado inicial, sólo se requiere la preparación del terreno estándar para la siembra y control de malezas en la fase de establecimiento.

5.2 Bajo costo

La aplicación del Sistema Vetiver en el tratamiento de aguas residuales representa una fracción de los costos en relación a los métodos convencionales, tales como un tratamiento químico o mecánico. La mayor parte del costo se encuentra en el material de siembra, con pequeñas cantidades de fertilizantes, herbicidas y mano de obra de la siembra. (Truong y Cruz, 2010).

5.3 Mantenimiento mínimo

Cuando está bien establecido, el SV prácticamente no requiere ningún mantenimiento para conservarlo funcionando. Todo lo que se requiere es cosechar dos o tres veces al año para exportar nutrientes y para aprovechar la parte aérea con lo que sea necesario. Esto está en franco contraste con otros sistemas que necesitan un mantenimiento regular costoso y un operador experto, a menudo un ingeniero, para hacerlo funcionar de manera eficiente.

6.0 REFERENCIAS

- Ash R. y Truong, P. (2003). The use of vetiver grass wetland for sewerage treatment in Australia. Proc. Third International Vetiver Conference, Guangzhou, China, Octubre 2003. Chomchalow, N, (2006). Review and Update of the Vetiver System R&D in Thailand. Proc. Regional Vetiver Conference, Cantho, Vietnam.

- Cull, R.H, Hunter, H, Hunter, M y Truong, P.N. (2 000). Application of Vetiver Grass Technology in off-site pollution control. II. Tolerance of vetiver grass towards high levels of herbicides under wetland conditions. Proc. Second Intern. Vetiver Conf. Tailandia, Enero 2000
- Danh, L. T, Truong, P., Mammucari, R., Tran, T. y Foster, N. (2009). Vetiver grass, *Vetiveria zizanioides*: A Choice Plant for Phytoremediation of Heavy Metals and Organic Wastes. International Journal of Phytoremediation, **11**:8,664-691
- Fonseca,R, Diaz, C, Castillo. M., Candia, J y P. Truong, P. (2006). Preliminary results of pilot studies on the use of vetiver grass for mine rehabilitation in Chile. Proc. ICV4, Caracas, Venezuela.
- Liao Xindi, Shiming Luo, Yinbao Wu y Zhisan Wang (2003).Studies on the Abilities of *Vetiveria zizanioides* and *Cyperus alternifolius* for Pig Farm Wastewater Treatment. Proc. Third International Vetiver Conference, Guangzhou, China, Octubre 2003.
- Lisena, M., Tovar, C., Ruiz, L,(2006). Estudio Exploratorio de la Siembra del Vetiver en un Área Degradada por el Lodo Rojo”. Proc. ICV4, Caracas, Venezuela.
- Luque, R., Lisena, M. y Luque, O. (2006) Vetiver System For Environmental Protection Of Open Cut Bauxite Mining At “Los Pijiguaos” –Venezuela.
- Luu Thai Danh, Le Thanh Phong, Le Viet Dung y Truong P (2006). Wastewater Treatment At A Seafood Processing Factory In The Mekong Delta, Vietnam. Fourth International Vetiver Conference, Caracas, Venezuela, Octubre 2006
- Molina, P, (2010). Metodología de aplicación de la tecnología vetiver (vs) para la absorción de nitrógeno y agua en terrenos regados con efluentes de la industria porcina. Esta conferencia
- Percy, I. y Truong, P. (2005). Landfill Leachate Disposal with Irrigated Vetiver Grass. Proc, Landfill 2005. National Conf on Landfill, Brisbane, Australia, Septiembre 2005
- Radloff, B., Walsh, K., Melzer, A. (1995). Direct Revegetation of Coal Tailings at BHP. Saraji Mine. Aust. Mining Council Envir. Workshop, Darwin, Australia.
- Roongtanakiat, L., Osotsapar, Y., y Yindiram,C. (2008). Effects of soil amendment on growth and heavy metals content in vetiver grown on iron . Kasetsart J. (Nat. Sci.) 42 : 397 - 406
- Shu Wensheng (2003).Exploring the Potential Utilization of Vetiver in Treating Acid Mine Drainage (AMD). Proc. Third International Vetiver Conference, Guangzhou, China, Octubre 2003.
- Smeal, C., Hackett, M. y Truong, P. (2003). Vetiver System for Industrial Wastewater Treatment in Queensland, Australia. Proc. Third International Vetiver Conference, Guangzhou, China, Octubre 2003.
- Truong, P.N. y Baker, D. (1998). Vetiver grass system for environmental protection. Technical Bulletin N0. 1998/1. Pacific Rim Vetiver Network. Office of the Royal Development Projects Board, Bangkok, Tailandia.

- Truong, P.N., Mason, F., Waters, D. y Moody, P. (2000). Application of Vetiver Grass Technology in off-site pollution control. I. Trapping agrochemicals and nutrients in agricultural lands. Proc. Second Intern. Vetiver Conf. Thailand, enero 2000
- Truong, P.N. y Hart, B. (2001). Vetiver system for wastewater treatment. Technical Bulletin No. 2001/2. Pacific Rim Vetiver Network. Office of the Royal Development Projects Board, Bangkok, Tailandia.
- Truong, P. y Smeal (2003). Research, Development and Implementation of Vetiver System for Wastewater Treatment: GELITA Australia. Technical Bulletin No. 2003/3. Pacific Rim Vetiver Network. Office of the Royal Development Projects Board, Bangkok, Tailandia.
- Truong, P.N.V. (2004). Vetiver Grass Technology for mine tailings rehabilitation. Ground and Water Bioengineering for Erosion Control and Slope Stabilisation. Editores: D. Barker, A. Watson, S. Sompatpanit, B. Northcut y A. Maglinao. Published by Science Publishers Inc. NH, USA.
- Truong, P., Tran Tan Van y Elise Pinnars (2008). Vetiver System Applications: A Technical Reference Manual. The Vetiver Network International, Febrero 2008.
- Truong, P y Cruz, Y. (2010). Vetiver System: A Low Cost and Natural Solution for the Prevention and Treatment of Contaminated Water. Proc. X Congress Water Resources and Environmental Health, Barcelo, Costa Rica.
- Wagner, S., Truong, P, Vieritz, A. y Smeal, C (2003). Response of vetiver grass to extreme nitrogen and phosphorus supply. Proc. Third International Vetiver Conference, Guangzhou, China, Octubre 2003.
- Xuhui Kong, Weiwen Lin, Biqing Wang y Fuhe Luo (2003). Study on vetiver's purification for wastewater from pig farm. Proc. Third International Vetiver Conference, Guangzhou, China, Octubre 2003.