

VETIVER PARA LA FITORREMEDIACIÓN EN TAILANDIA

Nualchavee Roongtanakiat

*Departamento de Radiación Aplicada e isótopos, Facultad de Ciencias,
Universidad Kasetsart, Bangkok, Tailandia*

Correo electrónico: nualchavee@gmail.com

RESUMEN

El espectacular crecimiento económico de Tailandia, provocó no sólo la pérdida de recursos naturales y de hábitats, sino que también generó un aumento en el nivel de contaminantes ambientales que podrían ser nocivos para los seres humanos. El Vetiver es ampliamente conocido por ser uno de los medios más eficaces para la estabilización de suelos y control de la erosión. Después de examinar su tolerancia a elementos tóxicos, se introduce el Vetiver para la fitorremediación, una tecnología verde para la usada para limpiar los suelos y aguas que contienen una amplia variedad de contaminantes. El éxito de la utilización del Vetiver para la fitorremediación depende de muchos factores, como las propiedades de los suelos de los cultivos, el grado de contaminación y tipos de contaminantes. En este trabajo, se estudian los aspectos generales del proceso de la fitorremediación y del uso del Vetiver en el mismo aplicados en Tailandia, especialmente para la descontaminación de metales pesados. También se discute el potencial del vetiver para descontaminar los residuos radiactivos.

Palabras clave: metales pesados, radionúclidos, *Chrysopogon zizanioides*

1. INTRODUCCIÓN

Tailandia es uno de los países de alto crecimiento en Asia, donde la agricultura sigue siendo una fuente importante de empleo e ingresos naturales. Con la revolución económica y el crecimiento demográfico, el desarrollo de la agricultura intensiva se ha aumentado de manera espectacular mayor producción. Esto ha afectado al medio ambiente a través de la deforestación, degradación de la tierra, contaminación y una pérdida importante de los recursos naturales y hábitats. En 1991, Su Majestad el Rey transmitió su idea novedosa utilizando al vetiver (*Chrysopogon* sp.) como una forma natural para abordar el problema de los suelos. El recomendó experimentar con la siembra del vetiver para evitar la erosión del suelo en los Centros Reales de Desarrollo y otras áreas en todo el país. Estos experimentos han demostrado que el vetiver no sólo previene la erosión del suelo, sino también conserva la humedad del suelo y los nutrientes. Desde entonces, los estudios de vetiver para la conservación del suelo y del agua han sido ejecutadas en muchas áreas, como en la estabilización de las carreteras, las presas, las orillas del embalse, la tierra agrícola empinada, la reforestación, etc.

2. CONCEPTO Y MECANISMO DE LA FITORREMEDIACIÓN

La fitorremediación es una tecnología innovadora que utiliza las plantas para eliminar, transferir, degradar o inmovilizar los contaminantes contenidos en el suelo con el objetivo de restaurar los sitios degradados a un estado útil. Hay varios mecanismos de fitorremediación basados en los procesos fisiológicos de las plantas como por ejemplo:

Fitoextracción: Las plantas captan y transfieren a los contaminantes a través de las raíces hacia las partes superiores de la planta, la cual puede ser cosechada y extraída del sitio.

Fitoestabilización: las plantas se utilizan para reducir la movilidad de los contaminantes y evitar la migración de ellos a las capas más profundas del suelo o las aguas subterráneas, por lo tanto, los contaminantes se estabilizan en el sustrato o raíces.

Phytovolatilización: Las plantas captan los contaminantes volátiles y los evaporizarán a través de las estomas.

Phytodegradación: Las plantas metabolizan y destruyen los contaminantes dentro del tejido vegetal.

Las ventajas de la fitorremediación han sido reportados por varios autores (Shu y Xia, 2003; Green y Hoffnagle, 2004; Morikawa y Erkin, 2003; Prasad, 2008). El costo de la fitorremediación es relativamente barato, el cual puede ser tan poco como \$15-\$40 por metro cúbico, mientras que la excavación y remoción puede costar \$100-\$400 por metro cúbico (Schnoor, 1997). El autor Salt et al. (1995) estima que el uso de la fitoextracción para limpiar una hectárea de suelo de una profundidad de 50 cm cuesta \$60,000-\$100,100 comparado con un mínimo de \$400,000 para la excavación y almacenamiento del suelo. La fitorremediación se considera una tecnología verde que puede mejorar la estética y tratar una amplia variedad de contaminantes en el medio ambiente. Adicionalmente, el uso de la fitorremediación es muy adecuada para sitios grandes, proporciona control de la erosión y evita el escurrimiento. Sin embargo, la fitorremediación tiene su limitación ya que es un proceso que lleva tiempo y puede tomar varias estaciones de crecimiento para llegar a limpiar un sitio. *Brown et al.* (1995) estima que se necesitarían 18 estaciones de crecimiento para reducir el Zn de un suelo contaminado con 100 mg kg Zn⁻¹ a un nivel de 40 mg kg Zn⁻¹ usando *Thlaspi caerulescens* con un rendimiento anual de 10 t ha⁻¹. Además, las plantas que absorben elementos tóxicos pueden ser considerados como un material peligroso que presenta riesgos a la vida silvestre y que puede contaminar la cadena alimenticia.

3. VETIVER: UNA PLANTA PROMETEDORA PARA LA FITORREMEDIACIÓN

Para una fitorremediación exitosa, la selección de plantas es un desafío importante. Es necesario utilizar especies y variedades de plantas que toleren altos niveles de contaminantes tóxicos y que sean adecuadas para las condiciones climáticas en la región de los sitios contaminados. Las plantas deben tener la resistencia adecuada a enfermedades, insectos, sequías, inundaciones y productos químicos para maximizar su éxito de supervivencia y biomasa. Para la remediación de metales pesados, el uso de plantas hiperacumuladoras puede aumentar la captación de metales, ya ellas son capaces de acumular 100 veces más que las plantas no acumuladoras (Lasat, 1996). Sin embargo, la mayoría de hiperacumuladoras de metales como el carraspique alpino (*Thlaspi caerulescens*), la mostaza de la china (*Brassica juncea*) y el helecho Chino (*Pteris vittata*)

L.) son lentos y producen poca biomasa. Algunas plantas no acumuladoras que toleran al metal y tienen alta producción de biomasa deben ser consideradas para la fitorremediación.

El Vetiver, una planta auspiciosa en la agricultura, es ampliamente conocida por su eficacia en el control de erosión y sedimentos. Se introdujo para conservación del suelo y del agua en Tailandia en 1991. Después de haber descubierto que el vetiver podía tolerar variaciones extremas en condiciones climáticas y suelos, incluyendo metales pesados (Truong 1996; Roongtanakiat y Chairroj, 2001a; Roongtanakiat y Chairroj, 2001b), el concepto de la utilización de vetiver para la fitorremediación ha sido realizado. Más tarde, Truong (1999); Greenfield (2002) y Roongtanakiat (2006) reportaron que el vetiver es no hiperacumulador. Sin embargo, las características únicas del vetiver compensan y superan los límites de la fitorremediación. El sistema de raíces fuertes y profunda del vetiver no restringe su uso a sitios únicamente con contaminación superficial. El Vetiver es tanto una xerófita y hidrófitas, por lo que se puede aplicar a los suelos y descontaminación de las aguas. No es una especie de malas hierbas y puede sobrevivir en ambientes adversos. Debido al carácter no hiperacumulador, el vetiver no representa un riesgo para los animales de pastoreo y la biomasa cosechada no debe clasificarse como residuos peligrosos. El Vetiver no sólo puede ser utilizado para la descontaminación de metales pesados (Shu y Xia, 2003; Chen et al., 2004; Roongtanakiat, 2009), pero también tiene el potencial para descontaminar petróleo (Brandt et al., 2006), 2,4,6 -trinitrotolueno (Markis, et al., 2007a y Markis, et al., 2007b), el fenol (Singh et al., 2007) y nucleidos radiactivos (Singh et al., 2008 y al Roongtanakiat et al., 2010). Al igual que en los demás países, la contaminación por metales pesados en el suelo y agua de Tailandia se ha convertido en un problema grave, por lo que se inició la investigación sobre el vetiver para la fitorremediación especialmente en la descontaminación de metales pesados (Roongtanakiat, 2009). Un estudio sobre el potencial del vetiver para la radiophytoremediation también generó información útil. Por lo tanto, en este trabajo se describen algunas experiencias de investigación en Tailandia sobre la fitorremediación de metales pesados y radionucleidos.

4. FITORREMEDIACIÓN DE METALES PESADOS

Los metales pesados pueden ser introducidos en el medio ambiente por las actividades geológicas y antropogénicas. Las fuentes de contaminación antropogénica de metales pesados son los efluentes industriales, la minería y productos químicos agrícolas, la energía y la producción de combustibles. En Tailandia, la rápida expansión industrial y el crecimiento demográfico ha dado lugar a un creciente grado de contaminación con metales pesados, convirtiéndose en uno de los problemas ambientales más graves de la época. A pesar de que varios metales como el Fe, Zn y Cu son esenciales para el sistema biológico cuando se encuentran en baja concentración, una concentración elevada puede actuar como sustancia venenosa e interferir con el metabolismo del cuerpo humano.

En 2003, el Departamento de Agricultura del Ministerio de Agricultura de Tailandia, reveló una contaminación grave de cadmio en el suelo y el arroz cultivado en las proximidades de una gran mina de zinc en el distrito de Mae Sot, en la provincia de Tak. Por lo tanto fue estudiada la capacidad del crecimiento del vetiver en los suelos contaminados de esta área y en la fitoextracción de metales pesados. Dos ecotipos de

Vetiver, el ecotipo Ratchaburi (*Chrysopogon nemoralis*) y el ecotipo Surat Thani (*Chrysopogon zizanioides*) se establecieron en suelos con cuatro metales pesados (Zn, Cd, Pb) con los niveles de contaminación (A1-A4), recogidos cerca de una mina de zinc en funcionamiento. El Vetiver creció bien en suelos no contaminados (A1) y en los suelos de baja a moderada contaminación (A2-A3), y altura de planta en la fecha de cosecha (120 días después de la siembra), fue significativamente mayor en estos tratamientos que en los de las plantas que crecieron en el muy suelo contaminado. Para la biomasa, el ecotipo Ratchaburi mostró un mejor desarrollo en las partes aéreas que en las raíces, dando mucho mayor peso seco de follaje pero menor peso seco de raíz en comparación con el ecotipo Surat Thani (Cuadro 1, 2). En cuanto a la absorción de metales pesados, el ecotipo Ratchaburi captó mas Zn y Pb que el Surat Thani, mientras que en ambos ecotipos de vetiver no hubo diferencia en la absorción de Cd (Figura 1). Generalmente, el vetiver puede acumular más metales pesados en las raíces que en los brotes, por lo que es adecuado para fitoestabilización según lo sugerido por Yoon *et al.*, 2006 y al Roongtanakiat *et al.*, 2008. Sin embargo, el ecotipo Ratchaburi tenía una absorción de Zn en los brotes significativamente más alta que Surat Thani debido al foliaje mas alto y, por lo tanto, este tiene un potencial considerable para la fitoextracción de Zn del suelo contaminado.

Este resultado confirma que la selección de ecotipos de vetiver es importante para una fitorremediación exitosa. Además, se requiere un estudio basico del crecimiento, la biomasa y la concentración de metales pesados en los brotes y las partes profundas, antes de la aplicación sobre el terreno.

Cuadro 1. Promedio del peso seco del follaje de los ecotipos Ratchaburi y Surat Thani cultivados en suelos con cuatro niveles de metales pesados

Suelo ^{1/}	Peso seco del follaje (g/maseta)		
	Ecotipo Ratchaburi	Ecotipo Surat Thani	Promedio ^{2/}
A1	31.1	27.3	29.2 a
A2	26.2	22.7	24.5 b
A3	24.8	25.7	25.3 b
A4	25.6	19.1	22.4 b
Promedio ^{2/}	26.9 a	23.7 b	

^{1/}A1- Suelo no contaminado, A2 - suelo de contaminación baja, A3- suelo moderadamente contaminado, A4 - suelo altamente contaminado

^{2/} Las cifras en la misma columna o fila que una letra común no son significativamente diferentes con 0.05 de probabilidad por DMRT.

Cuadro 2. Peso seco promedio de las raíces de los ecotipos de vetiver Ratchaburi y Surat Thani cultivados en suelo con cuatro niveles de metales pesados

Suelo ^{1/}	Peso seco de la raíz (g/maseta)		
	Ecotipo Ratchaburi	Ecotipo Surat Thani	Promedio ^{2/}
A1	12.1	19.5	15.8 a
A2	9.9	15.6	12.8 b
A3	9.1	16.4	12.8 b
A4	10.0	12.6	11.3 b
Promedio ^{2/}	10.3 b	16.0 a	

^{1/}A1- Suelo no contaminado, A2 - suelo de contaminación baja, A3 - suelo moderadamente contaminado, A4 - suelo altamente contaminado

^{2/} Las cifras en la misma columna o fila que una letra común no son significativamente diferentes con 0.05 de probabilidad por DMRT.

5. FITORREMEDIACIÓN DE RADIONUCLEIDOS

La contaminación radioactiva es la distribución incontrolada de un material radiactivo en un entorno determinado. Los ensayos nucleares, accidentes nucleares y la aplicación de la tecnología nuclear son las principales actividades que resultan en la contaminación de radionucleidos los cuales plantean un peligro a largo plazo de radiación para la salud humana a través de la cadena alimenticia y otros tipos de caminos. La fitorremediación de radionucleidos (radiophytoremediation) se ha convertido cada vez más importante. Las especies vegetales utilizadas para descontaminar radionucleidos deben ser resistentes a la radiación, tener crecimiento rápido y una alta capacidad de absorción de radionucleidos (Gulati et al. 1980; Sheppard et al. 1989; Saric et al. 1995). Con el fin de investigar el potencial del vetiver tailandés nativo para radiofitorremediación, dos experimentos se llevaron a cabo. En el primer experimento, la radiosensibilidad de dos ecotipos de vetiver, Surat Thani y Kamphaeng Phet 2, fueron probadas. Brotes de Vetiver de ambos ecotipos fueron preparados para 20 pruebas de cada tratamiento. Estos fueron irradiados con rayos gamma de la fuente de Cesio-137 con dosis de 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 y 100 Gy usando un irradiador gamma Mark I. Después de la irradiación, cinco brotes de vetiver se sembraron en cada maceta con 8 kg de tierra. El crecimiento del vetiver se observó 90 días después de la siembra para determinar la dosis GR₅₀.

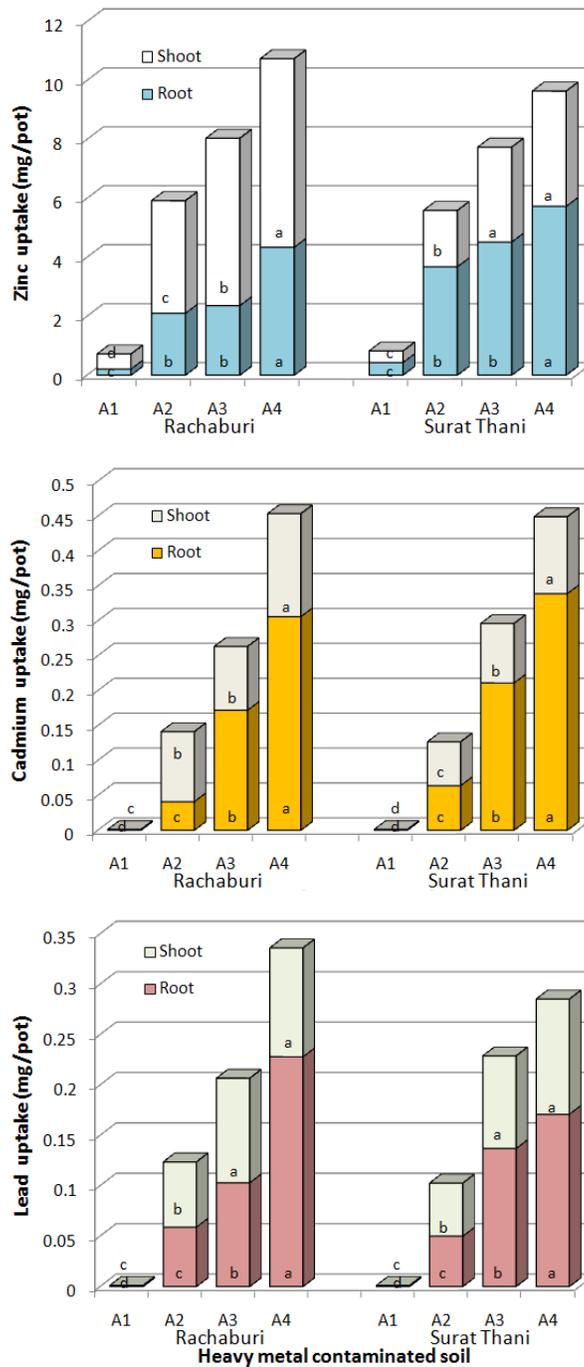


Figura 1. La absorción de Zn, Cd y Pb en el vástago y la raíz de los ecotipos de vetiver Ratchaburi y Surat Thani cultivados en cuatro niveles de contaminación del suelo.

^{1/}A1- Suelo no contaminado, A2 - suelo de contaminación baja, A3 - suelo moderadamente contaminado, A4 - suelo altamente contaminado

[Barras en la misma categoría, asociadas con una letra común no son significativamente diferentes con 0.05 de probabilidad por DMRT.]

Los resultados revelaron un efecto significativo de la dosis de radiación en el crecimiento del vetiver. Los tallos y la altura del vetiver irradiados disminuyó a medida que aumentó la dosis de radiación (Figura 2 y 3). Desde 60 Gy a dosis más altas, ningún ecotipo de vetiver podía desarrollar tallos nuevos. Dosis estimadas de GR_{50} las cuales redujeron la altura de vetiver con un ritmo de 50% comparado con el control 90 días después de la siembra fueron de 48 y 75 Gy en los ecotipos Surat Thani y Kamphaeng Phet 2, respectivamente (Figura 4). En comparación con otras especies de plantas, el GR_{50} fue 21.46 Gy en las cañas de la variedad de uva Amasya (semun *et al*, 2003) y 16.65 Gy en las plántulas jóvenes de jengibre antorcha (Jompuk, 2009), ambos mucho más bajos que el de vetiver. Esto indica que el vetiver es bastante resistente a la radiación. Entre dos ecotipos, el Surat Thani con menor GR_{50} fue más sensible a la radiación que Kamphaeng Phet 2.

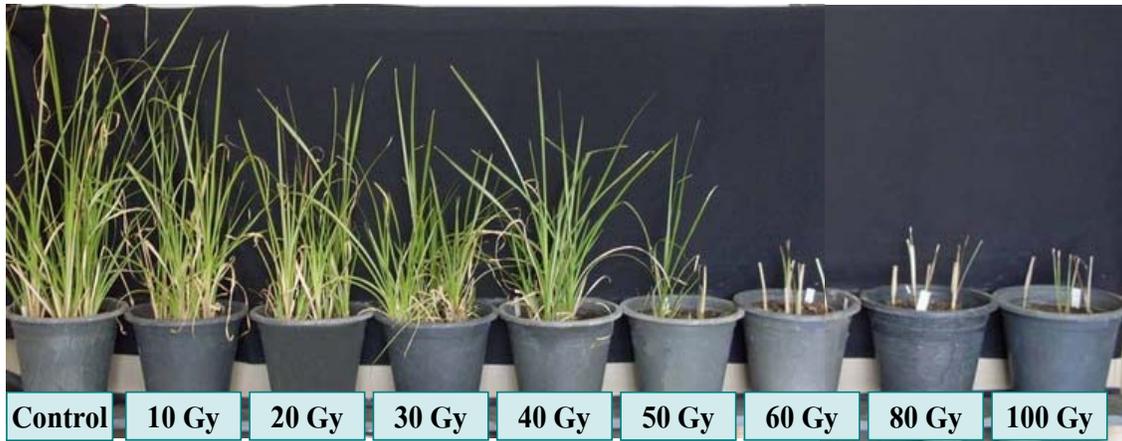


Figura 2. El crecimiento de las plantas de vetiver Surat Thani propagado con dosis de radiación gamma de 0 (control), 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 y 100 Gy

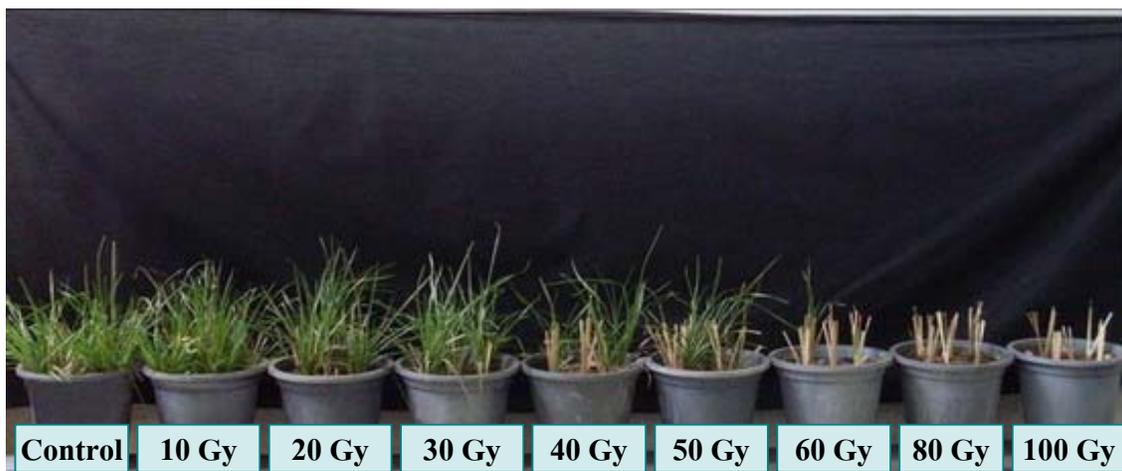


Figura 3. El crecimiento de las plantas de vetiver Kamphaeng Phet 2 propagado con dosis de radiación gamma de 0 (control), 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 y 100 Gy

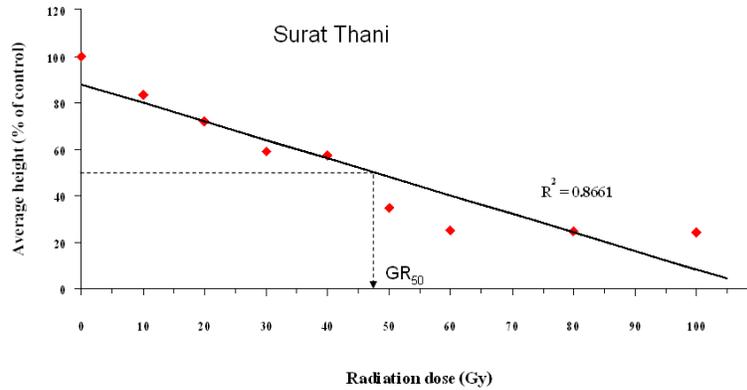


Figura 4. Diagrama para la estimación de GR₅₀ 90 días después de la siembra de el ecotipo de vetiver Surat Thani el cual fue irradiado con rayos gamma con dosis de 0 (control), 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 y 100 Gy

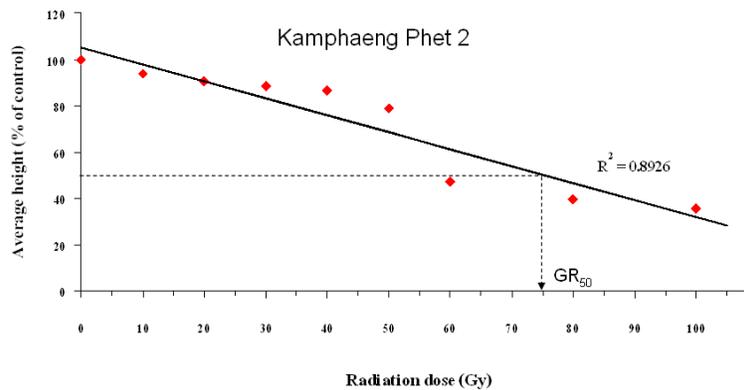


Figura 5. Diagrama para la estimación de GR₅₀ 90 días después de la siembra de el ecotipo de vetiver Kaemphaeng Phet 2 el cual fue irradiado con rayos gamma con dosis de 0 (control), 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 y 100 Gy

En el segundo experimento fue estudiada la capacidad de absorcion de radionucleidos del vetiver en la solución de “yellowcake” o torta amarilla. Las plántulas de vetiver se cultivaron en las probetas con las raíces sumergidas en 20 ml de solución de yellowcake con un pH 4 durante 3, 6 y 9 días. Después de la cosecha, las plantas de vetiver se lavaron con agua destilada. Para investigar la distribución de los radionúclidos en la planta, las plantas de vetiver que se cultivaron en una solución de 9 días fueron aplanadas con papel de presión hasta que las plantículas se secaron. Un rollo de PE (polietileno) fue usado para envolver las plantas secas con el fin de prevenir que la placa de imagen fuera contaminada por radionucleidos. Las plantas envueltas fueron colocadas sobre la placa de imagen (BAS-MS, Fuji Film Co.) durante 48 horas y luego leídas con un analizador de imágenes (Fujifilm Bas-2500). La imagen radiográfica reveló que el vetiver puede absorber y acumular más radionucleidos, en la raíz que en los tallos (Figura 6).

La actividad de los radionucleidos en las plantas de vetiver tambien fue determinada. Las muestras secas de plantas fueron incineradas a 400 ° C durante 6 horas. Cenizas de las plantas fueron pesadas y digeridas en una mezcla de ácido clorhídrico y ácido nítrico. Un contador de centelleo líquido *Wallac1220 Quantulus* fue usado para detectar la actividad de las alícuotas en términos del ritmo de conteo (conteo por minuto, cpm) utilizando Optiphas HiSafe 3 como cóctel de centelleo. El ritmo de conteo de la radiación por masa de cenizas de la planta, como se muestra en la Tabla 3, indica que los radionúclidos en la planta de vetiver aumentaron con la duración del período de exposición. Resultados similares fueron reportados mostrando que mientras más tiempo las plantas crecieran en una solución radioactiva, más radionucleidos serian absorbidos (Dushenkov et al., 1997). Sin embargo, el crecimiento del vetiver se redujo cuando el tiempo de la cultura era más largo según lo indicado por la reducción de peso de las cenizas. Puede ser debido a la toxicidad de la condición ácida de pH 4 y la falta de nutrientes de las plantas en la solución de la cultura.

Imagenes radiográficas y la radiactividad de vetiver sumergido en la solución yellowcake confirmó que el vetiver se podría aplicar para la fitorremediación y fitoestabilización especialmente debido a su sistema de raíces largas y densas y el hecho que más radionucleidos son acumulado en la parte de la raíz.

Cuadro 3. El peso promedio de ceniza por planta y radioactividad (cuentas por minuto) del vetiver empapado en solución *yellowcake* con un pH 4 durante 3, 6 y 9 días.

Periodo de sumerción (días)	Peso promedio de las cenizas de la planta en miligramos (mg) \pm SE	Contados por minuto por miligramo (cpm mg ⁻¹) \pm SE
3	119.5 \pm 17.7	34.3 \pm 2.4
6	167.6 \pm 42.8	43.4 \pm 1.2
9	109.7 \pm 1.6	73.0 \pm 1.1

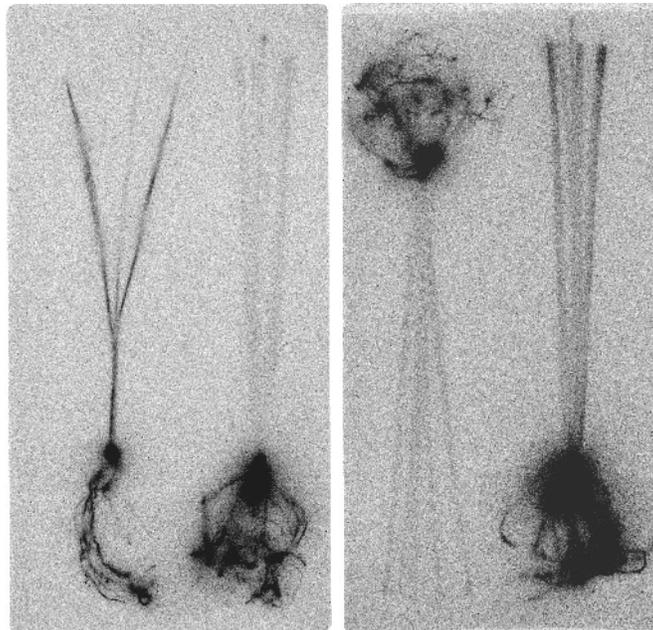


Figura 6. la imagen radiográfica de la planta vetiver cultured en la solución de óxido de uranio, revelando que el vetiver puede absorber y acumular más radionuclids, en la raíz que en los brotes.

6. CONCLUSIONES

En Tailandia, la fitorremediación se encuentra en su fase de investigación y desarrollo. El Vetiver ha recibido atención especial en cuanto a la aplicación de fitorremediación, debido a su características únicas que superan las limitaciones de fitorremediación. Las investigaciones descritas en este trabajo confirman que el vetiver es una planta con potencial para la descontaminación de metales pesados y radionucleidos. En general, el vetiver puede acumular metales pesados y radionucleidos más en las raíces que en los brotes. El Vetiver es bastante tolerante a la radiación gamma en comparación con la otras especies de plantas. La capacidad de absorción de metales pesados y la resistencia a la radiación son diferentes entre los dos ecotipos de vetiver probados. Por lo tanto, la selección de la variedad de vetiver es un factor clave de la fitorremediación eficaz.

7. AGRADECIMIENTOS

El apoyo financiero de la Oficina del Consejo de Proyectos Reales y el instituto de la Investigación y Desarrollo de la Universidad de Kasetsart es gratamente apreciada. Además, el autor agradece al Prof. Dr. Siranut Lamseejan, Prof. Arunee Wongpiyasatid y el Dr. Narong Chomchalow por sus valiosos comentarios.