



EFFECTO DE LA PRODUCCIÓN DE QUINUA EN LA EROSIÓN Y GENERACIÓN DE SEDIMENTOS EN LA SUBCUENCA ORINOCA, ORURO (BOLIVIA)

Pedro Vallejos ^{1*}, Gerardo Vallejos ², Ruth Maldonado ³, Jorge Juan ⁴

¹Universidad Técnica de Oruro, Facultad de Ciencias Agrarias y Naturales. Avenida 6 de Octubre y Cochabamba, No 5715. Oruro, Bolivia

²Universidad Técnica de Oruro, Facultad Nacional de Ingeniería. Avenida 6 de Octubre y Cochabamba, No 5715. Oruro, Bolivia

³Fundación MADEPRO (Medio Ambiente, Desarrollo y Producción). Área Ambiental

⁴Universidad Politécnica de Catalunya, Escuela Politécnica de Manresa; Avenida Bases de Manresa, 6173; 08240 Manresa, Barcelona, España

*Autor de correspondencia: vallejos_pedro@yahoo.es

Recibido 30 de mayo de 2020; aceptado 04 de julio de 2020

RESUMEN

Una actividad de gran importancia en el departamento de Oruro (Bolivia) es la producción de quinua, situación dada por la creciente demanda nacional e internacional de este cultivo acompañado de un ritmo de expansión agrícola a escala exponencial. La sub-cuenca Orinoca no es ajena a esta realidad, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el cambio de uso de suelo y su efecto en la erosión hídrica y generación de sedimentos. Para el caso, se generó mapas de cobertura vegetal a partir del año 1992, cambios de uso de suelo fueron evaluados hasta el año 2014, técnicas de clasificación supervisada y no supervisada de imágenes de satélite se aplicaron en el procedimiento. Los resultados muestran que de 1992 a 2008 la producción de quinua generó un cambio de uso de suelo con tendencia lineal, mientras

que de 2004 a 2014 la producción de quinua reporto un crecimiento exponencial, pasando de 313.5 ha a 9155.5 ha., en este contexto se encontró que el 40% de la vegetación de tholar (*Baccharis, Parastrephia*), el 20 % de la vegetación pajonales (*Festuca orthophylla-stipa*), el 20% de la vegetación pajonal-tholar y tholar-pajonal y el 10% de la vegetación de chiji (*Pennisetum clandestinum*) ahora son destinados a cultivos de quinua. Los resultados encontrados muestran que cambiar una hectárea de cobertura vegetal nativa por cultivos de quinua conlleva en aumentar hasta 3 veces la tasa de erosión de suelos, y que la producción de sedimentos se incrementa de 638351.78 m³/año a 747495.91 m³/año, con lo cual el aporte efectivo de sedimentos de la sub-cuenca al lago Poopo aumenta de 9304.14 m³/año a 10894.94 m³/año.

PALABRAS CLAVE: *Chenopodium quinoa*, cobertura vegetal, expansión agrícola

ABSTRACT

An activity of great importance in the city of Oruro (Bolivia) is the quinoa production, a situation given by the growing national and international demand for this crop accompanied by a rate of agricultural expansion on an exponential scale. The Orinoca sub-basin is no stranger to this reality, the objective of this work is to evaluate the change in land use and its effect on water erosion and sediment generation. For the case, vegetation cover maps were generated from the year 1992, land use changes were evaluated until 2014, supervised and unsupervised classification techniques of satellite images were applied in the procedure. The results show that from 1992 to 2008 quinoa production generated a change in land use with a linear trend, while from 2004 to 2014 quinoa production reported exponential growth, going from 313.5 ha to 9155.5 ha., In this context it was found that 40% of tholar vegetation (*Baccharis, Parastrephia*), 20% of grassland vegetation (*Festuca orthophylla-stipa*), 20% of grassland-tholar and tholar-grassland vegetation and 10% of the Chiji vegetation (*Pennisetum clandestinum*) are now destined for quinoa crops. The results found show that changing one hectare of native plant cover for quinoa crops leads to an increase of up to 3 times the rate of soil erosion, and that the production of sediments increases from 638351.78 m³/year to 747495.91 m³/year, with which the effective contribution of sediments from the sub-basin to Lake Poopo increases from 9304.14 m³/year to 10894.94 m³/year.

KEY WORDS: *Chenopodium quinoa*, vegetation cover, agricultural expansion

INTRODUCCIÓN

El cambio de uso de suelo hace referencia a los cambios constantes que sufre la superficie terrestre debida a la apertura de nuevas tierras agrícolas, desmontes, asentamientos humanos, industriales, construcción de aeropuertos, carreteras, etc (Soria et al., 1998). En la actualidad, los estudios sobre los procesos dinámicos de los cambios en la cobertura vegetal y la deforestación son importantes y necesarios, porque proporcionan la base para conocer las tendencias de los procesos de degradación, desertificación y pérdida de la biodiversidad de una región (Van Lynden y Oldeman, 1997). Existen diversos métodos para la detección de cambios de uso de suelos, siendo los más aplicados la comparación por clasificación y cambios detectados mediante álgebra de imágenes satelitales (diferencia de bandas o cociente) (Green et al., 1994; Mas, 1999; Tole, 2002). La fotointerpretación representa una de las técnicas para evaluar la dinámica de cambio de uso de suelos mediante fotografías aéreas (Herrera, 1983). Los cambios de uso de suelos pueden evaluarse a través de la comparación histórica de fotografías aéreas e imágenes satelitales de diferentes años (FAO, 1984; Ortiz-Solorio et al., 1994), mismas que son analizadas

y evaluadas en software especializados de sistemas de información geográfica (SIG).

El cambio de uso de suelos en zonas agrícolas, forestales, pecuarias y urbanas afecta directamente a la erosión y a la capacidad de retención de humedad en el suelo (Leopoldo G. et al., 2007). La erosión se define como el desplazamiento de partículas de suelo de la parte alta hacia la parte baja produciendo pérdida de la capacidad productiva (Suárez de Castro, 1980). La erosión es un proceso natural producido por el agua y el viento, pero actividades antrópicas como las prácticas agrícolas extensivas y los cambios de uso de suelos pueden acelerar el proceso de erosión Morgan (1997). La erosión hídrica constituye uno de los principales procesos de pérdida de suelo y representa una de las formas más completas de la degradación englobando tanto a la degradación física, química y biológica del suelo (Colomer, Sanchez, 2001). La erosión hídrica y eólica son responsables de aproximadamente el 84% de la extensión global de tierras degradadas, lo que hace que la erosión excesiva sea uno de los problemas ambientales más importantes en todo el mundo (Blanco et al., 2010). El transporte y la deposición de sedimentos producto de la erosión son determinados por la erodabilidad del suelo, el clima, la topografía y el

uso de suelos; su intensidad puede estar definida por actividades humanas tal como las prácticas agrícolas, deforestación, etc. (Efthimioun N. et al., 2015).

Bolivia cuenta con una superficie de 1098581 km², de acuerdo a los datos proporcionados por el mapa de cobertura y uso actual de la tierra (Zerain, R. et al, 1978) el 82,21% está cubierto por tierras con pastos y bosques susceptibles de ser usadas en forma más intensa, lo que comporta un riesgo potencial muy alto de erosión y/o degradación de estos ecosistemas. Este impacto causa problemas en las zonas donde se producen sedimentos y que luego afectan la fertilidad de los suelos, produciendo además el rellenado de presas y la colmatación de lagos (Zerain, R. et.al., 1978).

Una de las actividades de gran importancia agrícola que se presenta en el sur del departamento de Oruro y particularmente en el altiplano boliviano es la producción de Quinua (*Chenopodium quinoa Willd*), situación que, se ha dado por la creciente demanda y el incremento de precio de este producto en el mercado internacional (Jaldin 2011). La quinua es un grano considerado estratégico para la soberanía alimentaria e históricamente es uno de los principales alimentos del hombre andino. Por alrededor de 7000 años ha sido

cultivado en la región andina donde es apreciado por su adaptabilidad a condiciones ambientales difíciles y por su valor nutritivo; pues contiene proteína, carbohidratos, minerales (hierro, fósforo y zinc), fibra, isoflavonas y antioxidantes (Jacobsen & Sherwood, 2002; Peralta, Mazón, Murillo, Rivera, & Monar, 2012).

Producto de la alta demanda internacional del cultivo de quinua, en el altiplano boliviano se ha presentado una irracional expansión de la frontera agrícola tendientes a producir efectos negativos en los ecosistemas del altiplano Boliviano. En el lugar es evidente encontrar prácticas agrícolas de monocultivo intensivo, disminución de los años de descanso de la tierra e incremento en el uso de maquinaria agrícola pesada (Fundación AUTAPO, 2008).

Se estima que en un futuro próximo el lago se colmate de sedimentos, residuos orgánicos e inorgánicos (metales pesados) produciendo una catástrofe ambiental y económica, por cuanto muchas familias desarrollan sus actividades económica y productivas en base a la producción de quinua y la producción piscícola del lago Poopo (Vallejos P., et al., 2018).

En la sub-cuenca Orinoca, el cambio de uso de suelo producto de la expansión de la frontera agrícola no es

ajeno, en el lugar es evidente observar, como extensas superficies de vegetación nativa (tholares, pajonales y áreas de pastoreo) han sido deforestadas para pasar a ser áreas agrícolas de cultivos de quinua, realidad que es observada en el sur del departamento de Oruro (Vallejos P., et al., 2011).

Si bien se conoce el problema, en la sub-cuenca Orinoca aún es desconocido el efecto que ha producido el cambio de uso de suelos (pastoreo y praderas nativas) sobre la erosión hídrica y la producción de sedimentos. Razón por el cual el presente trabajo tiene como objetivo, identificar en las dos últimas décadas los cambios de uso de suelo presentados en la sub-cuenca y evaluar su efecto en la producción de sedimentos, para el caso se han utilizado imágenes de satélite, reconocimientos de campo y aplicación de modelos de predicción de sedimentos procesados sobre plataforma de sistema de información geográfica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el presente trabajo, imágenes de satélite Landsat y modelos de elevación digital (DEM) fueron obtenidas de <https://glovis.usgs.gov/app?fullscreen=1>, correcciones radiométricas y geométricas se aplicaron sobre las imágenes de satélite. Los datos climáticos se obtuvieron de los reportes mensuales de la estación de Quillacas (SEHAMHI, Bolivia).

Levantamientos GPS con equipo navegador garmin se realizaron en el área de estudio, software SIG se usó para el análisis espacial.

ÁREA DE ESTUDIO

La sub-cuenca Orinoca es parte de la cuenca del lago Poopo y está a su vez es parte del gran sistema hídrico Titicaca-Desaguadero-Poopo-Salares (TDPS), este sistema está bajo la tuición del proyecto binacional Perú-Bolivia denominado Autoridad del Lago Titicaca (ALT). La cuenca del lago Poopo tiene una superficie de 25254.64 km², es una área ecológicamente frágil por cuanto al ser la parte baja de la cuenca endorreica TDPS todos los sedimentos, residuos orgánicos, residuos minerales y otros se transportan por los ríos y se depositan en el lago del mismo nombre.

Geográficamente la sub-cuenca Orinoca se localiza a 18°55'5534" LS y 67°09'15.38" LW, distante a 185 km al sur de la ciudad de Oruro y a unos 15 km al oeste del lago Poopo. Según la clasificación Pfafstetter (Bolivia), corresponde a la unidad hidrográfica 01333 nivel 5, en la sub-cuenca la principal población es la comunidad de Orinoca, municipio de Andamarca, provincia Sud Carangas, departamento de Oruro. La sub-cuenca abarca una superficie de 526,17 km², su punto más bajo se localiza a 3694 msnm, y su punto más alto está a 4053

msnm. La figura 1, muestra la ubicación geográfica de la sub-cuenca Orinoca.

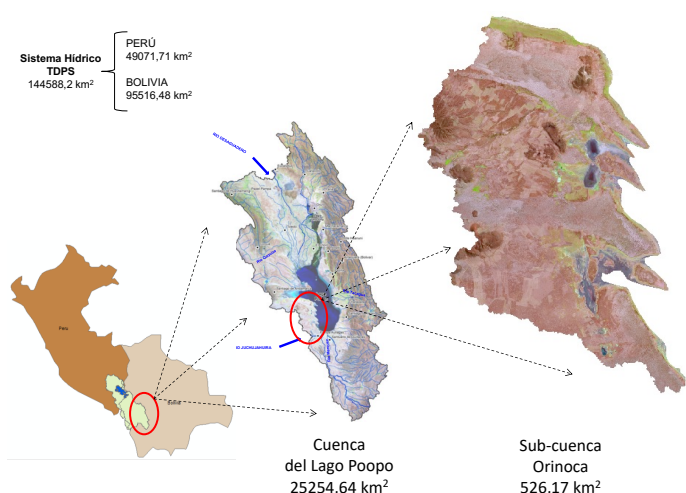
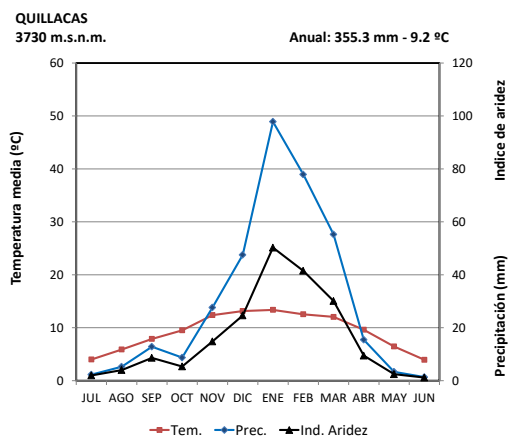


Figura 1.- Ubicación geografía de la sub-cuenca Orinoca

Fuente: elaboración propia

Según los datos meteorológicos de la estación de Quillacas (periodo 1994 a 2014), se reporta una precipitación anual de 355.3 mm, una temperatura media anual de 9.2°C., bajo estas condiciones en el área se tiene 7 meses hiperaridos (abril a octubre), 2 meses subhúmedos (enero y febrero) y 3 meses áridos y semiáridos, La figura 2, muestra el diagrama climático en la estación de Quillacas.



Meses hiperaridos (IA: <5) = 7
 Meses áridos a semiáridos (IA: 5-20) = 3
 Meses subhúmedos (IA: 20-30) = 2

Figura 2.- Climadiagrama de la estación de Quillacas

Fuente: elaboración propia

COBERTURA VEGETAL AÑO 1992

El mapa de cobertura vegetal del año 1992, se generó a partir del procesamiento de imágenes satelitales Landsat 5TM de 19920418. Dado que la vegetación es función de la respuesta espectral de la superficie del terreno así como del piso altitudinal, para la evaluación de la misma se relacionó la respuesta espectral, el modelo de elevación digital y una imagen combinada 543 (falso color). El procedimiento se inicia con la clasificación de la imagen NDVI en 32 clases, se aplica en mismo procedimiento para la imagen composición color 543 (CC543) y la imagen de elevaciones (DEM). A partir de las tres imágenes se genera una imagen compuesta NDVI-CC543-DEM, el cual nuevamente es clasificado en 32 unidades, finalmente esta imagen es reclasificada en 13

unidades mediante una clasificación supervisada, cada unidad representa una unidad de cobertura vegetal la cual ha sido validada en campo mediante levantamiento de datos GPS. La figura 3, muestra el proceso de elaboración del mapa de cobertura vegetal aplicado para la zona de estudio.

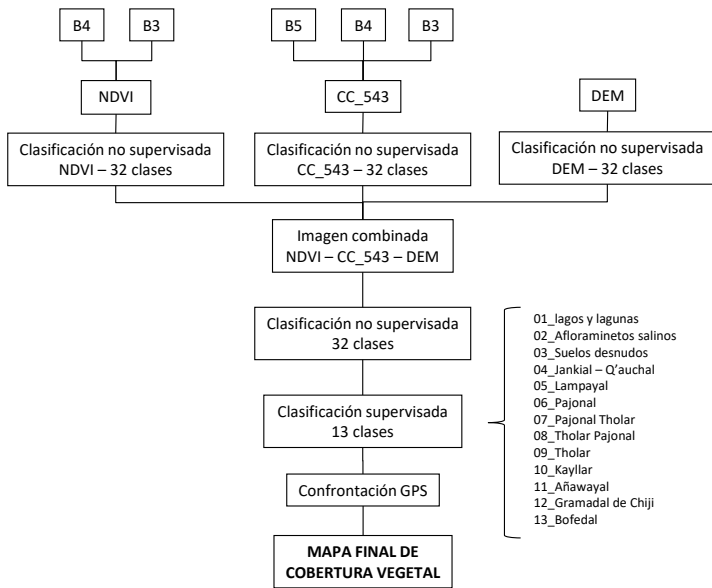


Figura 3. Flujograma de elaboración del mapa de cobertura vegetal. Fuente: elaboración propia

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), es un índice de comprobada eficiencia para realzar la señal de la vegetación frente a otras cubiertas, la misma es determinada mediante la siguiente ecuación:

$$NDVI = \left[\left(\frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} \right) * 127 \right] + 128$$

Dónde:

NDVI = Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado;

SWIR = Valor de reflectancia en la banda del infrarrojo cercano

NIR = Valor de reflectancia en la banda del rojo.

CARTOGRAFÍA DE EXPANSIÓN AGRÍCOLA

Paralelamente se fueron generando los mapas de áreas agrícolas (áreas productoras de quinua) para el periodo 1992 a 2014. Se utilizaron imágenes satelitales de la serie Landsat de las fechas: Landsat 5 TM de 19920418, Landsat 5 TM de 19960312, Landsat 5 TM de 20000408, Landsat 5 TM de 20040302, Landsat 5 TM de 20080210, Landsat 5 TM de 20100319, Landsat 8 AOI de 20140330, todas las imágenes se homogeneizaron a la proyección UTM, zona 19, datum WGS84. Estas imágenes permitieron identificar los cambios de cobertura vegetal producto de la expansión de área agrícola en la sub-cuenca, procedimientos de digitalización de parcelas de quinua fueron aplicados sobre imágenes combinadas falso color.

En la sub-cuenca, la quinua se producen en parcelas mínimo de 100m x 100m, los cuales son fácilmente observables en las imágenes Landsat cuya resolución espacial es de 30m x 30m.

Bajo la hipótesis, de que el cambio de uso de suelos se presentó sobre la vegetación nativa, se evaluó la vegetación más afectada a partir del año 1992.

PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS COMO FUNCIÓN DEL CAMBIO DE LA COBERTURA VEGETAL Y USO DE SUELOS

El modelo distribuido de Garvilovic 1988 (Garvilovic, 1988; Zemljic, 1971) fue el aplicado para evaluar la tasa de erosión de suelos, el modelo estima la cantidad de material producido por erosión hídrica en términos de volumen de sedimentos generados y transportados a la sección de cierre de la cuenca, la ecuación (1) expresa la relación para su determinación:

$$G = W * R \quad \text{Ec. (1)}$$

Dónde:

G = Volumen de sedimento por erosión (m³/año)

W = Producción media anual de sedimentos (m³/año)

R = Coeficiente de retención de sedimentos

Las ecuaciones (2); (3); (4) describen los parámetros para evaluación la producción media anual de sedimentos “W”, por su parte el cuadro 1, muestra los valores adimensionales para la determinación del coeficiente de erosión Z (Garvilovic, 1988):

$$W = T * P * \Pi * Z^{3/2} * F \quad \text{Ec. (2)}$$

$$T = \left[\left(\frac{tm}{10} \right) + 0.1 \right]^{0.5} \quad \text{Ec. (3)}$$

$$Z = Y * X(\theta + S)^{0.5} \quad \text{Ec. (4)}$$

Dónde:

W = Volumen potencial de sedimentos erosionado (m³/año)

T = Factor de temperatura

Tm = Temperatura media anual (°C)

P = Precipitación media anual (mm)

F = Superficie de la cuenca (km²)

Z = Coeficiente de erosión (cuadro 1)

Y = coeficiente de erodabilidad del suelo

X = coeficiente que cuantifica la vegetación

Θ = coeficiente que cuantifica el estado erosivo

S = pendiente de la superficie del terreno (%).

Cuadro 1.- Coeficientes adimensionales Y, X, θ

Coeficientes adimensionales					
X (vegetación)		Y (erodabilidad)		θ (estado erosivo)	
Zonas desprovistas de vegetación o con vegetación exigua	1,00	Cuartario – cubierta de acarreos indiferenciados	1,80	Erosión enérgica	1,00
Áreas de actividad agropecuaria	0,80	Ordovícico – lutitas y areniscas verdosas	1,10	Erosión por carcavamiento moderado a severo	0,90
Vegetación predominantemente arbustiva	0,70	Precámbrico – pizarras y filitas grises y morados	1,10	Remoción en masa menos reptación de escombros de talud	0,80
Vegetación herbácea de cobertura rala	0,60	Cretácico – Areniscas, conglomerados y pelitas rojas – calizas amarillas	0,90	Reptación de escombros de talud	0,80
Vegetación arbustiva y boscosa mezclada	0,60	Cámbrico – areniscas cuarcíticas grises y morados	0,50	Suelos sobre sustratos rocosos	0,70
Bosque de alta montaña – porte achaparrado	0,60	Precámbrico – granito de Tipayoc	0,50	Abanicos aluviales	0,70
Bosque de alta montaña – baja densidad	0,60	Terciario – areniscas y conglomerados rosados	0,25	Terrazas bajas – abanicos aluviales aterrizados	0,70
Vegetación herbácea de cobertura semidensa a densa	0,40			Terrazas altas	0,70
Bosque de alta montaña – media densidad	0,40			Áreas de uso humano	0,60
Bosque de alta montaña – alta densidad	0,20			Morenas glaciares y acumulaciones derribales	0,60
				Regolito – manto derribial de cumbres	0,60
				Suelo del área boscosa	0,40
				Lechos fluviales	0,20

Fuente: X y θ (Spalletti y Brea, 1997); Y (Rivelli F, basado en valores de Gavrilovich, 1989)

El coeficiente de retención de sedimentos (R) que expresa la relación entre el volumen de material producido por erosión superficial y el volumen de sedimentos que efectivamente llega a la sección de cierre de la cuenca, fue determinado a partir de la ecuación propuesta por Zemljic (1971) (ecuación 5):

$$R = \frac{(O * D)^{1/2} * (L + Li)}{(L + 10) * F} \quad \text{Ec. (5)}$$

Dónde:

- O = Perímetro de la cuenca (km)
- D = Diferencia de nivel media en la cuenca (km)

$$D = Dm - Dc$$

- Dm = Cota media de la cuenca
- Dc = Cota mínima de la cuenca
- L = Longitud de la cuenca por el talweg del cauce principal (km)
- Li = Longitud total de los afluentes fluviales laterales (km)
- F = Superficie de la cuenca (km²)

Los datos de precipitación y temperatura media se extrajeron del trabajo desarrollado por Vallejos P., et al., 2017. Para el caso de estudio se ha considerado constantes los coeficientes de erodabilidad y estado erosivo, variando la cobertura vegetal.

RESULTADOS

COBERTURA VEGETAL AÑO 1992

Se ha encontrado que la mayor superficie de la sub-cuenca Orinoca estuvo cubierta por vegetal de pajonal (*Festuca orthophylla-stipa*) con 20.02%; vegetación pajonal-tholar y vegetación de tholar-pajonal con 19.40% y 16.33% respectivamente y vegetaciones de tholar (*Baccharis, Parastrephia*) y gramadal de chiji ((*Pennisetum clandestinum*) con 14.57% y 11.55% respectivamente, también estuvieron expuestas amplias extensiones de suelos con afloramientos salinos alcanzando estas un área aproximada de 12.40% del área total de la cuenca. La figura 4, muestra el mapa de cobertura vegetal de la sub-cuenca Orinoca, año 1992; La figura 5, muestra la relación de superficie de las unidades de cobertura vegetal en la sub-cuenca;

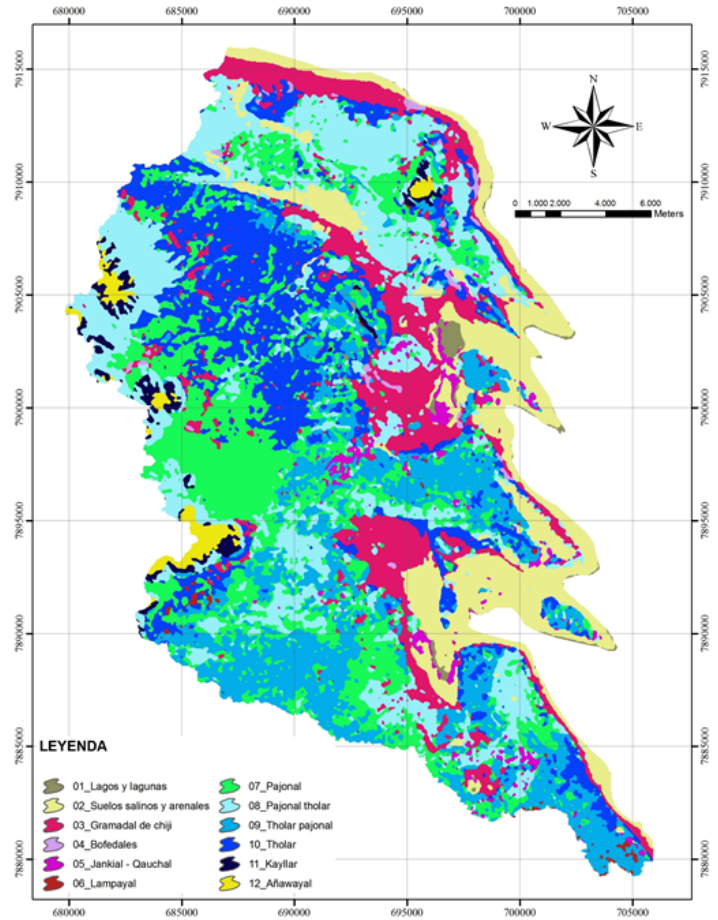


Figura 4. Distribución espacial de las unidades de cobertura vegetal en la sub-cuenca Orinoca, año 1992

Fuente: elaboración propia

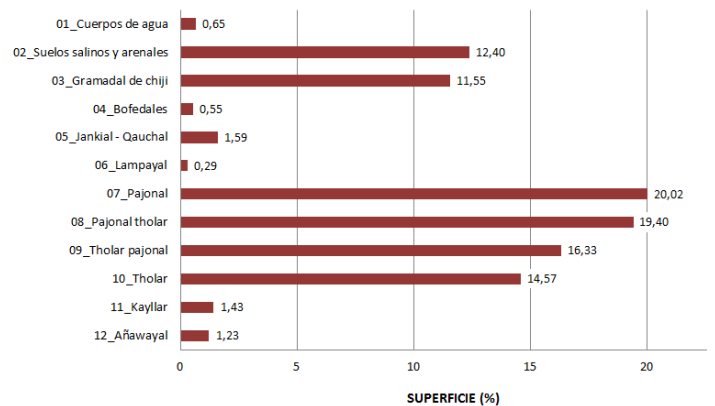


Figura 5. Relación de superficie de las unidades de cobertura vegetal en la sub-cuenca, año 1992

Fuente: elaboración propia

EXPANSIÓN AGRÍCOLA DE LA QUINUA

De la gestión 1992 a la gestión 2014, la producción de quinua se fue incrementando producto del elevado precio de este producto en el mercado internacional. En la sub-cuenca Orinoca esta situación no fue diferente, se ha estimado que desde la gestión 1992 a 2014 las áreas productoras de quinua se han incrementado de 27.6 has, a 9155.5 has., durante este periodo dos tendencias de expansión de área agrícola se identificaron, el primero con una tendencia de crecimiento lineal (periodo 1992 a 2008), en este periodo las superficies de quinua se han incrementado de 27.6 has a 311.5 has, el cual representa una tasa de crecimiento anual de 17 has por año, en el segundo periodo (año 2008 a 2014), se ha encontrado que las áreas agrícolas se expandieron siguiendo una tendencia exponencial con una razón de crecimiento de casi 884.2 has por año. La figura 6, muestra la tendencia de expansión de la frontera agrícola en la sub-cuenca Orinoca.

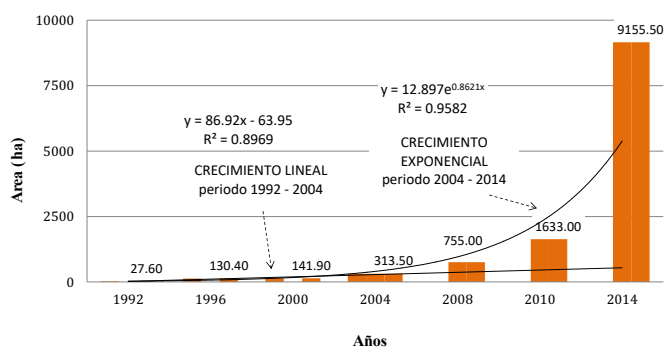


Figura 6.- Expansión de área agrícola de cultivos de

quinua en la sub-cuenca Orinoca

Fuente: elaboración propia

Se ha encontrado que, aproximadamente el 40% de la vegetación de tholar y casi el 20 % de la vegetación pajonales han sido cambiados por cultivos de quinua siendo estas las unidades vegetales más afectadas, similares tendencias se observaron en las unidades de vegetación pajonal-tholar y tholar-pajonal, en el caso de los gramadales de chiji, aproximadamente 10% de estas superficies fueron cambiados por cultivos de quinua. la figura 7, muestra fotografías de las unidades de cobertura vegetal presentes en la sub-cuenca, la figura 8, muestra el ritmo de los cambios de cobertura vegetal; la figura 9, muestra las unidades vegetales afectadas por la expansión de área agrícola; la figura 10, muestra el cambio temporal y espacial de la expansión de área agrícola.



Tholares



Pajonales con tropas de vicuñas



Aperturas de tierra



Cultivos de quinua

Figura 7.- Praderas nativas y cultivos de quinua en la sub-cuenca Orinoca, fotos.

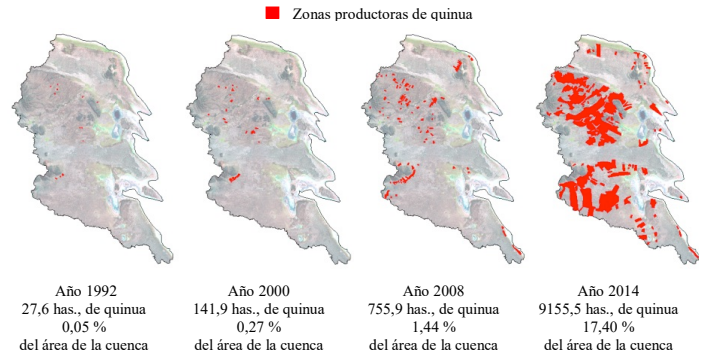


Figura 10.- Cambio temporal y espacial de la expansión de frontera agrícola vista sobre imágenes de satélite

Fuente: elaboración propia

PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS COMO FUNCIÓN DE LA EXPANSIÓN AGRÍCOLA

La producción de sedimentos evaluado como función del cambio multitemporal del coeficiente de vegetación, establece que en la cuenca, este coeficiente no mostro cambios sustanciales en el periodo 1992 a 2008 manteniéndose en 0.68, es a partir del año 2010 que el coeficiente muestra un incremento, llegando a ser 0,74 en el año 2014. El cuadro 2, muestra el coeficiente de vegetación ponderado en la sub-cuenca Orinoca, así como los cambios de vegetación para cada año de análisis.

Se ha encontrado que, de entre el periodo 1992 a 2014 la erosión de suelos se incrementó de 638351.78 m³/año a 747495.91 m³/año respectivamente, lo que indica que en aproximadamente un poco más de una década las 9128 has de cultivos de quinua han ocasionado que la erosión

Figura 8.- Ritmo de cambio de cobertura vegetal en la sub-cuenca Orinoca, periodo 1992 a 2014

Fuente: elaboración propia

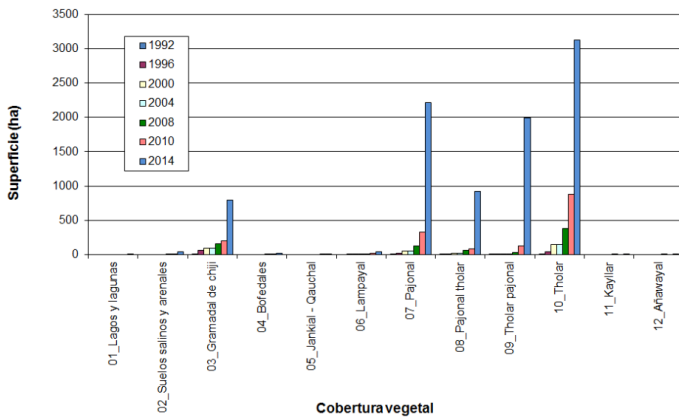


Figura 9.- Unidades vegetales afectadas por la expansión de área agrícola en la sub-cuenca Orinoca

Fuente: elaboración propia

de suelos en el lugar aumente en 109144.13 m³, siendo en el periodo 2010 a 2014 el mayor aumento. El cuadro 3, muestra las tasas de erosión de suelos como producto del cambio del factor de cobertura vegetal en la sub-cuenca Orinoca.

Cuadro 2.- Coeficiente de vegetación (X) ponderado y cambios en las superficies de vegetación en la sub-cuenca Orinoca

COBERTURA VEGETAL	Coef. Vege. (X)	SUPERFICIE (has)						
		1992	1996	2000	2004	2008	2010	2014
01. Lagos y lagunas	0	341,0	341,0	341,0	341,0	341,0	341,0	340,2
02. Suelos salinos y arenales	1	6523,0	6523,0	6523,0	6523,0	6521,6	6518,2	6480,6
03. Gramadal de chiji	0,4	6064,1	6014,5	6028,5	5988,6	5920,3	5875,2	5285,1
04. Bofedales	0,2	287,0	287,0	287,0	287,0	286,4	283,4	268,3
05. Jankial – Quachal	0,8	835,0	835,0	835,0	835,0	835,0	834,8	823,3
06. Lampayal	0,7	153,0	152,8	153,0	150,8	150,6	138,2	116,0
07. Pajonal	0,6	10533,3	10515,3	10511,3	10480,5	10414,9	10212,8	8321,8
08. Pajonal tholar	0,7	10206,1	10204,2	10205,8	10192,6	10145,7	10125,3	9292,7
09. Tholar pajonal	0,7	8591,0	8588,5	8585,8	8583,7	8565,4	8468,3	6604,1
10. Tholar	0,7	7660,8	7630,4	7609,7	7526,3	7286,8	6791,8	4534,7
11. Kayllar	0,8	750,0	750,0	750,0	750,0	749,7	750,0	749,8
12. Añawayal	0,8	646,0	646,0	646,0	646,0	645,8	646,0	645,8
13. Cultivos extensivos (quinua)	1	27,6	130,4	141,9	313,5	755,0	1633,0	9155,5
Sumatoria		52618	52618	52618	52618	52618	52618	52618
Media ponderada del coeficiente de vegetación (X)		0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,69	0,74

Cuadro 3.- Tasa de erosión de suelos producto del cambio del factor de cobertura vegetal en la sub-cuenca Orinoca

Nº	Cobertura vegetal	Tasa de erosión año 1992 m ³ /ha año	Tasa de erosión año 2014 (actuales áreas de quinua) m ³ /ha año	Diferencia m ³ /ha año	Incremento en la tasa de erosión %
1	Tholar	12,44	25,92	13,44	108
2	Pajonal	11,58	23,73	12,15	105
3	Tholar pajonal	10,71	18,32	7,61	71
4	Pajonal tholar	12,41	20,97	8,56	69
5	Gramadal de chiji	6,35	19,26	12,91	203

Se ha encontrado que:

- Cambiar una hectárea de tholar y/o pajonal por quinua conlleva en aumentar en aproximadamente 100 % más la tasa de erosión de suelos.
- Cambiar una hectárea de asociación vegetal de

tholar-pajonal y/o pajonal-tholar conlleva en aumentar aproximadamente 70% más la tasa de erosión se suelos.

- Para el caso de la superficie de gramadal de chiji cambiar una hectárea de esta cobertura vegetal conlleva en aumentar aproximadamente un 200% más de la tasa de erosión se suelos. Este dato es interesante por cuanto se afirma que al ser las coberturas vegetales de gramadales de chiji los que protegen más al suelo de la erosión, estos llegan a ser suelos frágiles cuando son aperturados para producción de quinua.

Según el coeficiente de retención de sedimentos (R = 0.01), calculado a partir de:

$$\text{Long. del rio principal (L)} = 24.59 \text{ km}$$

$$\text{Long. total de los ríos (Li)} = 108.50 \text{ km}$$

$$\text{Área de la sub-cuenca (F)} = 526.18 \text{ km}^2$$

$$\text{Perim. de la sub-cuenca (O)} = 153.93 \text{ km}$$

$$\text{Cota media (Dm)} = 3719.81$$

msnm

$$\text{Cota mínima (Dc)} = 3694 \text{ msnm}$$

Se ha encontrado que, el volumen de sedimentos que llega a la salida de la sub-cuenca se ha incrementado de 9304.14 m³/año (1992) a 10894.94 m³/año (2014) es decir

que en 22 años, el cambio de uso de suelos ha hecho que la sub-cuenca aporte al lago Poopo 1590.80 m³/año más de sedimentos. La figura 11, muestra el volumen de sedimentos que aporta la sub-cuenca Orinoca al lago Poopo, periodo 1992 a 2014.

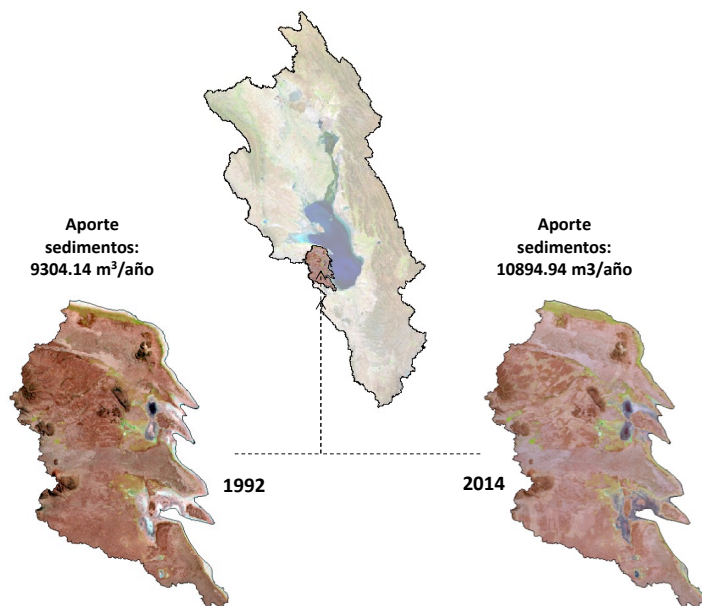


Figura 11.- Volumen de sedimentos que aporta la sub-cuenca Orinoca al Lago Poopo vista sobre imágenes de satélite, año 1992 y 2014

Fuente: elaboración propia

CONCLUSIONES

Las principales asociaciones de vegetación identificadas en la sub-cuenca Orinoca según orden de importancia son el pajonal, pajonal-tholar, tholar-pajonal, tholar y gramadal de chiji.

La expansión de la frontera agrícola (1992-2014), ha

generado que, en la sub-cuenca Orinoca se tenga 9128 has., de cultivo de quinua, produciendo un incremento en la tasa de erosión de suelos de 638351.78 m³/año a 747495.91 m³/año, es decir que en 22 años la erosión de suelos ha aumentado en 109144.13 m³.

Las principales coberturas vegetales afectadas fueron, el tholar, pajonal, seguido de las asociaciones vegetales de tholar-pajonal, pajonal-tholar y en los últimos años la vegetación de gramadal de chiji.

Durante el periodo de análisis (1992 a 2014) se ha encontrado que: aproximadamente el 40% de la vegetación de tholar, el 20 % de vegetación pajonal, de vegetación pajonal-tholar y de vegetación tholar-pajonal han sido cambiados para cultivos de quinua. En el caso de los gramadales de chiji casi el 10% de estas coberturas vegetales han sido cambiados.

Dos tendencias de expansión de área agrícola se identifican, el primero con una tendencia de crecimiento lineal (1992 a 2008) en el que las áreas productoras de quinua se habrían incrementado de 28 has a casi 312 has aproximadamente, representando una tasa de incremento de 24 has/año, en el segundo periodo (2010 – 2014), el crecimiento de expansión agrícola fue de manera exponencial con una razón de crecimiento de casi las 1000

has/año.

Según el coeficiente de retención de sedimentos (R), se ha encontrado que, el volumen de sedimentos que llega a la salida de la sub-cuenca (periodo 1992 a 2014), se incrementó de 9304.14 m³/año a 10894.94 m³/año, es decir que, en un poco más de una década la sub-cuenca ha venido aportando al lago Poopo 1590.80 m³ más de sedimentos, favoreciendo al proceso de colmatación del lago.

El incremento de la demanda de este producto en el mercado internacional y la consecuente elevación de su precio, ha hecho que en el sur del altiplano boliviano se presente un gran cambio de uso de suelos principalmente a partir de la gestión 2010 coincidiendo con el periodo de más alta demanda de este producto en el mercado europeo.

El cambio de la cobertura vegetal ha hecho que estos suelos sean muy frágiles y vulnerables a los procesos erosivos, situación que se agrava cuando en el lugar, la práctica de una agricultura intensiva y estacional asociado a los fuertes vientos (250 a 300 km/día, marzo) y las intensas precipitaciones estacionales van ocasionando una gradual e inminente desertificación de los suelos.

Por lo expuesto, es importante que se tomen acciones orientadas a la aplicación de modelos sostenibles de producción agrícola enmarcadas en buenas prácticas de manejo, uso y conservación de suelos, con acciones orientadas a la reforestación de suelos con especies nativas.

BIBLIOGRAFÍA

- BLANCO, HUMBERTO; LAL, RATTAN (2010). «Soil and water conservation». *Principles of Soil Conservation and Management*. Springer. p. 2. ISBN 978-90-481-8529-35
- COLOMER, J.C. SÁNCHEZ DÍAZ, J. (2001). Agricultura y procesos de degradación del suelo. En Martín de Santa Olalla Mañas (Ed.) *Agricultura y Desertificación* (pp 111-131). Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- EFTHIMIOU N., LYKOUDI E., PANAGOULIA D., KARAVITIS C. (2015). Assessment of soil susceptibility to erosion using the EPM and RUSLE Models: the case of venetikos river catchment. *Global NEST Journal*. 18. 1-16.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1984). Metodología provisional para la evaluación y la representación cartográfica de la desertización. Roma, Italia.
- Fundación AUTAPO – Programa Quinoa Altiplano Sur. (2008). Informe: Fertilidad, uso y manejo de suelos en

- la zona del Intersalar, departamentos de: Oruro y Potosí. Oruro - Bolivia . Pág. 5 - 28, 40 – 58, 98
- GAVRILOVIC Z. (1988); The use of an empirical method (Erosion Potential Method) for calculating sediment production and transport in unstudied or torrental streams. Wallingford, England.
- GREEN, K., D. KEMPKA Y L. LACKELY. (1994). Using remote sensing to detect and monitor land-cover and land-use change. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 60: 331-337.
- HERRERA H., B. (1983). Elementos de fotogrametría, uso de los materiales aerofotográficos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (1989). Uso potencial del suelo. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- JACOBSEN, S., & SHERWOOD, S. (2002). *Cultivos de granos andinos en Ecuador: Informe sobre los rubros quinua, chocho y amaranto*. Quito, Ecuador: Editorial Abya-Yala.
- JALDIN QUINTANILLA ROSSMARY (2011) PRODUCCIÓN DE QUINUA EN ORURO Y POTOSÍ. Programa de Investigación Estratégica en Bolivia (PIEB), Ed. Monserrat Fernández. La Paz, Bolivia
- MAS, J.F. (1999). Monitoring land-cover changes: A comparison of change detection techniques, *Int. J. Remote Sensing* 20: 139-152.
- MORGAN, R. (1997). Erosión y conservación del suelo. (en línea). Madrid, España. Consultado 2 may. 2009. Disponible en http://books.google.cl/books?id=jcFqaFIu1UC&printsec=frontcover&dq=morgan&source=gbs_summary_r&cad=0#PPP1,M1
- ORTIZ-SOLORIO, L., M. ANAYA G. Y J.W. ESTRADA B. (1994). Evaluación, cartografía y políticas preventivas de la degradación de la tierra. Colegio de Posgraduados, Universidad Autónoma de Chapingo y CONACyT. México, D.F.
- PERALTA, E., MAZÓN, N., MURILLO, A., RIVERA, M., & MONAR, C. (2012). *Manual agrícola de granos andinos*. Quito: Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP).
- SORIA R., J., C.A. ORTIZ-SOLORIO, F. ISLAS G. Y V. VOLKE H. (1998). Sensores remotos, principios y aplicaciones en la evaluación de los recursos naturales: Experiencias en México. Publicación Especial 7. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.
- SUÁREZ DE CASTRO, F. (1980). Conservación de suelos, San José, Costa Rica, IICA: 321 p.
- TOLE, L. (2002). An estimate of forest cover extent and change in Jamaica using Landsat MSS data. *Int. J. Remote Sensing* 223: 91-106.

VALLEJOS PEDRO, ZAMORA GERARDO, JORGE

JUAN. (2018). Estimación de la tasa sedimentos en la cuenca minera del lago Poopo mediante el modelo potencial de erosión de suelos (EPM) y tendencias ante variaciones climáticas - Uso de herramientas SIG y teledetección. REV. MAMYM no.4. Oruro

VALLEJOS, P.; NAVARRO, Z.; AYAVIRI, D. (2011).

Medio ambiente y producción de quinua. Estrategias de adaptación a los impactos del cambio climático.

PIEB, DANIDA, PROSAMA. La Paz, Bolivia, 242 p.

VAN LYNDEN, G.W.J. Y L.R. OLDEMAN. (1997). The

assessment of the human-induced soil degradation in South and Southeast Asia. International Soil Reference and Information Centre Wageningen, The Netherlands.

ZERAIN, R. et al. (1978). Mapa de Cobertura y Uso

Actual de las Tierra, Bolivia. Serie Sensores Remotos 2.

GEOBOL. La Paz.