



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-316

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Protección del suelo frente al riesgo de erosión: el papel de las plantaciones forestales en la calidad del agua

GARTZIA-BENGOETXEA, N.¹, URRUTIKOETXEA, I.¹ y ARIAS-GONZÁLEZ, A.¹

¹ NEIKER. Departamento de Conservación de Recursos Naturales. 812 Bizkaiko Zientzia eta Teknologia Parkea. 48160 Derio. Bizkaia.

Resumen

Los ecosistemas forestales, cuando se gestionan de manera sostenible, juegan un papel central en la prevención de la degradación del suelo y la calidad del agua. Este estudio propone una metodología para identificar zonas de actuación prioritaria para la conservación del suelo y la protección de las captaciones de agua de abastecimiento urbano, que podría suponer un avance en la gestión integral de las cuencas hidrográficas con orografías complejas mediante una gestión forestal sostenible. En la cuenca hidrográfica del río Artibai, ocupada principalmente por plantaciones forestales de pino radiata, se calculó el riesgo de erosión (sin cubierta forestal) y la erosión mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE). Su comparación mostró que las plantaciones en estado latizal o fustal reducen significativamente la erosión del suelo. El estudio de las características geomorfológicas de la cuenca y las áreas pendiente arriba de las captaciones posibilitó la delimitación de zonas de protección para la calidad del agua de abastecimiento urbano, y la posterior propuesta de pautas de gestión forestal y del sistema de compensación por provisión de agua. La implementación real en campo de esta propuesta se considera necesaria para probar su idoneidad y traslado a otras cuencas hidrográficas.

Palabras clave

Plurifor, SAGA, área pendiente arriba, captaciones, pino radiata.

1. Introducción

Los ecosistemas forestales, cuando se gestionan de manera sostenible, juegan un papel central en la regulación del ciclo hídrico y la prevención de la degradación del suelo. Muchos países confían en "montes protectores" para preservar la calidad del suministro de agua potable, aliviar las inundaciones y protegerse contra la erosión, los deslizamientos de tierra y la pérdida de suelo (Forestry Commission, 2011). Se reconocen cada vez más los beneficios de los montes protectores y la ordenación sostenible de los bosques para la calidad del agua y se crean bosques para salvaguardar el medio ambiente del agua. De hecho, la ley 43/2003 de Montes define Montes de Utilidad Pública y Montes protectores aquellos que:

- a) Sean esenciales para la protección del suelo frente a procesos de erosión.
- b) Los situados en cabeceras de cuencas hidrográficas y aquellos otros que contribuyan decisivamente a la regulación del régimen hidrológico, evitando o reduciendo aludes, riadas e inundaciones y defendiendo poblaciones, cultivos e infraestructuras.
- c) Los que eviten o reduzcan los desprendimientos de tierras o rocas y el aterramiento de embalses y aquellos que protejan cultivos e infraestructuras contra el viento.
- d) Los que sin reunir plenamente en su estado actual las características descritas en los párrafos a), b) o c) sean destinados a la repoblación o mejora forestal con los fines de protección en ellos indicados.

Sin embargo, el crecimiento demográfico, el aumento de la demanda de madera y fibras, y el aumento del uso de la biomasa forestal como energía renovable, además de la creciente

competencia en los mercados mundiales, están ejerciendo una mayor presión sobre la demanda de productos procedentes de ellos. Esto suele ir acompañado de una intensificación del manejo forestal. Estas actividades pueden exacerbar los procesos de degradación del suelo y suponer un riesgo para la calidad del agua. La red de control y vigilancia de las aguas de consumo público de la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV) del Departamento de Salud identifica como posible suceso peligroso para las captaciones de agua de abastecimiento urbano la actividad forestal (tala, construcción de pistas...). Asimismo, son posibles sucesos peligrosos la erosión del suelo y las lluvias torrenciales. Estos sucesos peligrosos se intensifican en el periodo de interrotación que se extiende desde la cosecha hasta el cierre de copas de la nueva plantación. En él la cobertura arbórea desaparece tras la corta a hecho, lo que deja el suelo descubierto durante un período variable de tiempo que se repite cada turno. Este período es de especial relevancia en zonas montañosas como las de la cornisa cantábrica. Las labores de desembosque de la madera y el tráfico de maquinaria generan compactación, pérdida de mulch de mantillo y alteración del horizonte superficial del suelo (Gartzia-Bengoetxea et al., 2009ab). Frecuentemente, la subsiguiente preparación del terreno para la plantación es mecanizada y produce más compactación, desplazamientos de suelo y el consecuente aumento del riesgo de erosión (Gartzia-Bengoetxea et al., 2006). Esto puede contribuir al transporte de sedimentos a los cursos de agua en detrimento de la calidad del agua.

La gestión sostenible de los recursos naturales debe adaptarse a las condiciones climáticas y medioambientales de la zona, por lo que es necesario identificar zonas con limitaciones naturales para la actividad forestal. Plan Territorial Sectorial Agroforestal (PTS Agroforestal) de la CAPV aprobado en 2014 incorpora nuevos condicionantes superpuestos a los definidos por las Directrices de Ordenación del Territorio (DOT), debido fundamentalmente a su valor para la conservación. El artículo 56 establece que en las zonas con altos riesgos erosivos se mantendrá, con criterio protector restaurador, la cubierta arbórea y arbustiva cuando ésta exista en la actualidad, o se introducirá y extenderá la misma en el caso de contar con cubierta vegetal rala como elemento fundamental de protección frente a los fenómenos erosivos. Se evitarán aquellas actividades que afecten a la estabilidad del suelo, extremando el cuidado de las prácticas agroforestales necesarias en estas zonas. Asimismo, las actuaciones en estas zonas requerirán de la elaboración de Planes de Gestión Hidrológico-Forestal. Por tanto, es evidente que la gestión de los bosques y las plantaciones forestales debe incorporarse a la gestión integral sostenible de los recursos naturales a escala de cuenca hidrográfica ya que como establece la Ley 1/2006 de Aguas la cuenca hidrográfica es la unidad de gestión del recurso agua y se considera indivisible.

En este contexto, para poder progresar en la integración de las medidas que permitan asegurar los servicios de los ecosistemas que las masas forestales brindan a la sociedad desde la planificación y la gestión forestal, es prioritario generar conocimiento sobre identificación de zonas de conservación de suelo y protección de calidad de agua. Esto permitirá mejorar los planes de gestión hidrológico-forestal y clarificar el papel de las plantaciones forestales en la gestión integrada de las cuencas.

2. Objetivos

El objetivo general de este estudio es proponer una metodología para identificar zonas de actuación prioritaria para la conservación del suelo y la protección de las captaciones de agua de abastecimiento urbano mediante una gestión forestal sostenible. Para ello, los objetivos específicos son:

1. Determinar el riesgo de erosión en una cuenca hidrográfica con alta cobertura de plantaciones forestales.
2. Evaluar el papel de las plantaciones forestales en la reducción de la erosión.
3. Identificar zonas de actuación prioritaria para la conservación del suelo y la protección de las captaciones de agua.

4. Proponer medidas de gestión forestal y medidas de compensación por la provisión de agua de consumo humano.

3. Metodología

3.1. Área de estudio

Se seleccionó como zona de estudio la cuenca hidrográfica del río Artibai, en la vertiente atlántica de la CAPV, con una extensión de 103,5 km² y con un rango de altitud que va desde los 1000 metros hasta el nivel del mar. La cuenca, que abastece a una población de 16000 habitantes, tiene un clima caracterizado por una precipitación media anual de 1200 mm distribuidos a lo largo de todo el año, una temperatura media de 13 °C y una media de máximas y mínimas de 17 °C y 9 °C, respectivamente.

Con un 59% de la cuenca ocupada por plantaciones forestales (IFN4), éstas son principalmente de *Pinus radiata* D.Don y se gestionan en turnos de 35-40 años con cortas a hecho y posterior preparación mecanizada.

3.2. Riesgo de erosión y erosión en Artibai

La pérdida de suelo potencial o riesgo de erosión y la erosión se calcularon mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) (Wischmeier & Smith, 1978).

$$A = R * K * LS * CP \quad (1)$$

donde, A = pérdida de suelo (t ha⁻¹ año⁻¹), R = factor de erosividad de la lluvia (MJ mm h⁻¹ ha⁻¹ yr⁻¹), K = factor de erodabilidad del suelo (t h MJ⁻¹ mm⁻¹), LS = factor topográfico (función de longitud-inclinación-forma de la pendiente) (adimensional), y CP = factor de cubierta vegetal y prácticas de conservación (adimensional).

Se utilizaron los datos de erosividad de la lluvia (**factor R**) de 86 estaciones meteorológicas de la CAPV (González-Arias y Martínez de Arano, 2005) para desarrollar modelos de regresión lineal para relacionar dicho factor con variables climáticas con distribución espacial como la precipitación anual, precipitación media mensual o la precipitación de Octubre a Mayo. Los modelos de regresión lineal se eligieron tratando de minimizar la raíz cuadrada del error cuadrático medio y maximizar el R².

El **factor K** se determinó a partir de 45 muestras de suelo analizadas para textura y materia orgánica del suelo. Posteriormente, se utilizó el mapa litológico (Artetxe et al., 2014) para interpolar espacialmente el factor de erodabilidad a escala de cuenca hidrográfica.

El cálculo del **factor LS** se realizó utilizando la ecuación original propuesta por Desmet y Govers (1996) y se implementó utilizando SAGA (Sistema de Análisis Geocientíficos Automatizados), sistema de información geográfica (SIG) de código abierto usado para editar y analizar datos espaciales que incorpora un algoritmo de flujo múltiple y contribuye a una estimación precisa de la acumulación de flujo. Para ello se utilizó un modelo de elevación digital (DEM) de alta resolución (5 m) y se limitó la estimación de LS a un ángulo de pendiente máxima del 50% (Panagos et al., 2015).

Finalmente, el riesgo de erosión se evaluó ejecutando (1) en el supuesto de una ausencia total de cobertura del suelo (CP = 1; basado en van der Knijff, 2000) y la erosión ejecutando (1) según cubierta forestal del 4º Inventario Forestal Nacional de 2011 categorizada en 5 estados de masa (tala, repoblado, monte bravo, latizal y fustal). Los factores CP aplicados se presentan en la Tabla 1:

Tabla 1. Valores del factor CP aplicados para el cálculo de la erosión con la cubierta forestal según IFN4 y el estado de masa de las plantaciones de pino radiata

| Estado de masa para pino radiata | CP-factor | Referencias |
|----------------------------------|-----------|--------------------------|
| Fustal | 0,001 | Wischmeier & Smith, 1978 |
| Latizal | 0,003 | Wischmeier & Smith, 1978 |

| | | |
|-------------|------|--|
| Monte bravo | 0,02 | González-Arias y Martínez de Arano, 2005 |
| Repoblado | 0,45 | Olarieta, 2003 |
| Tala | 0,6 | Olarieta, 2003 |

3.2. Características geomorfológicas de la cuenca

La obtención de las características geomorfológicas de la cuenca hidrográfica se realizó con SAGA. El esquema de trabajo fue el siguiente:

- Preprocesado del DEM: relleno de depresiones (Fill sinks).

A la hora de trazar las líneas de flujo se consideró la posibilidad de que el flujo se pueda acumular en alguna depresión en el interior del DEM, y que la red resultante no se desarrolle hasta el límite del modelo. Una depresión en un DEM se define como la celda o conjunto de celdas rodeadas por puntos de mayor elevación y hace referencia a atributos naturales o antrópicos del paisaje o a errores en los datos. A través de esta herramienta se rellenaron las depresiones cerradas que afectan al modelado hidrológico de la cuenca.

- Dirección de flujo (Flow direction)

Es el primer archivo derivado del DEM sin depresiones. Se asignó a cada celda un valor en función de la dirección hacia donde drenaba o, lo que es lo mismo, en función de la dirección de la máxima pendiente.

- Acumulación de flujo (Flow accumulation)

A partir del archivo de direcciones de flujo se obtuvo el archivo de acumulación del mismo. En este paso se determinó el número de celdas que drenan a cada celda. Hay que indicar que la celda de estudio no se contabilizó en el proceso. Desde el punto de vista físico, la acumulación de flujo es una medida del área de drenaje, expresada en unidades de celdas, que puede ser pasada a m² o km² multiplicando el número de celdas por el tamaño de celda del modelo.

- Área pendiente arriba (Upslope area)

Una vez obtenidas las características geomorfológicas esenciales de la cuenca, se localizaron las captaciones de agua para abastecimiento urbano que, cumpliendo con lo estipulado en el artículo 32 de la Ley 1/2006, de 23 de junio, de Aguas, se encontraban en la cuenca. Para cada una de las captaciones se calculó el área pendiente arriba que engloba todas las celdas que aportan agua a la misma utilizando el algoritmo de flujo múltiple (López-Vicente et al., 2014).

3.3. Identificación de zonas prioritarias de actuación para la conservación de la calidad de agua para abastecimiento urbano.

Las plantaciones forestales de pino radiata que tuvieran captaciones de agua para abastecimiento urbano de la cuenca se consideraron zonas prioritarias de actuación por su importante papel en la conservación del suelo y de la calidad de las aguas para consumo humano. En el área pendiente arriba de cada captación se definieron 3 zonas de protección: 75, 200 y 400 metros desde la captación (Figura 1) según Figuepron et al. (2014).

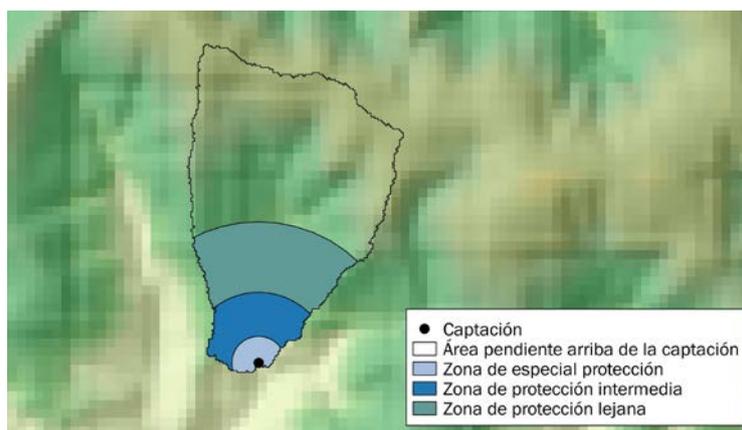


Figura1. Ejemplo de las tres zonas de protección a definir en el área pendiente arriba de cada una de las captaciones.

Zona de especial protección: se define como el perímetro de protección de captaciones superficiales y subterráneas de agua y comprende un buffer de 75 metros en el área pendiente arriba de la captación.

Zona de protección intermedia: comprende un buffer desde el límite de especial protección hasta 200 metros en el área pendiente arriba de la captación.

Zona de protección lejana: comprende un buffer desde el límite de protección intermedia hasta 400 metros en el área pendiente arriba de la captación.

3.4. Análisis de datos.

El análisis, la manipulación y la presentación de los datos georreferenciados se realizó con Quantum GIS (www.qgis.org) y SAGA GIS (www.saga-gis.org). Los modelos de regresión lineal se desarrollaron con R (www.r-project.org).

4. Resultados

4.1. Riesgo de erosión y erosión en la cuenca hidrográfica de Artibai.

La función de regresión más adecuada para extrapolar el factor R a escala de cuenca hidrográfica fue la siguiente:

$$\text{Factor R} = -148,36 * 0,307 (\text{precipitación anual}) R^2 = 0,67.$$

Posteriormente se utilizaron los datos rasterizados de precipitación anual de alta resolución temporal (1960-1990) (Wang & Hamann, 2012) para estimar el factor R de la cuenca hidrográfica que resultó en una erosividad de lluvia media de $2058 \pm 62 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$. El valor medio de la erodabilidad del suelo, o factor K, de la cuenca fue de $0,039 \pm 0,002 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. Por su parte, el factor LS combinado, que describe el efecto de la topografía sobre la erosión del suelo, tomó un valor medio de 10,2 en la cuenca de Artibai, resaltando la complejidad de la orografía de la cuenca.

En la Figura 2 se presentan los resultados de los factores R, K y LS de la cuenca hidrográfica estudiada, comunes para el cálculo del riesgo de erosión y erosión.

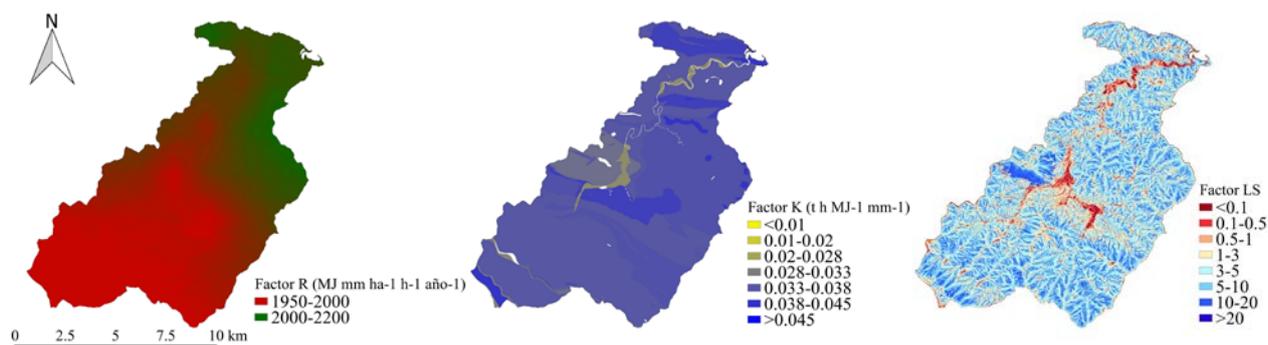


Figura2. Mapas de los factores R, K y LS de la ecuación USLE para la cuenca hidrográfica de Artibai.

Tras ejecutar (1) con estos factores y el factor de cubierta vegetal y prácticas de conservación (CP) correspondiente a cada uno de los casos (CP=1 para el riesgo de erosión y valores CP de la Tabla 1 para erosión), se obtuvieron los mapas de riesgo de erosión y erosión para Artibai (Figura 3). El 53% de la cuenca presentó un riesgo de erosión muy alto, sin embargo la erosión en la mayoría de las plantaciones forestales de pino radiata fue baja o muy baja, aunque habría que resaltar las talas y los repoblados con erosiones altas, superiores a lo establecido por el PTS Agroforestal de la CAPV.

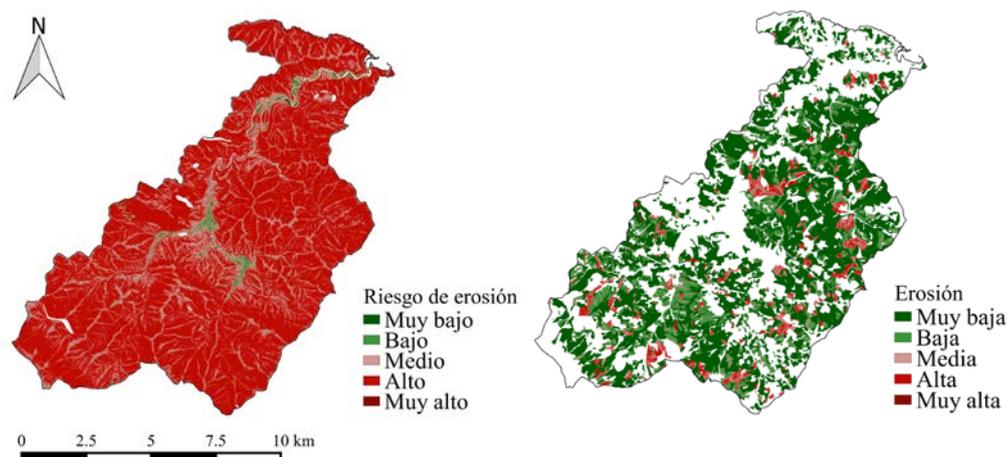


Figura3. Mapas de riesgo de erosión (izquierda) y de erosión en las plantaciones de pino radiata (derecha) de la cuenca hidrográfica de Artibai según USLE.

4.2. Identificación de zonas de actuación prioritaria para la protección de las captaciones de agua

Se localizaron las zonas de captación de agua para abastecimiento urbano que proporcionen un volumen medio de, al menos, 10 metros cúbicos diarios o abastezcan a más de 10 habitantes según lo estipulado en el artículo 32 de la Ley 1/2006, de 23 de junio, de Aguas.

En Artibai se localizaron 29 zonas de captación de agua para abastecimiento urbano, 27 en suelo forestal y 2 en zonas de prado. De entre las captaciones situadas en suelo forestal 13 se situaban en pinares de radiata, 1 en pinar de marítimo, 6 en bosque mixto atlántico y 6 en bosque de galería.

Sólo las captaciones sobre pinares de radiata suministran más 2500 m³ diarios y podrían abastecer a más de 20.000 personas.

Todas las zonas donde se sitúan las captaciones de agua presentaron un riesgo de erosión entre alto y muy alto. Sin embargo, aquéllas con plantaciones de pino radiata en estado latizal o fustal presentaron una erosión muy baja mientras que las plantaciones en estado de monte bravo o tala presentaron una erosión alta (Tabla 3).

Tabla 3. Captaciones de agua para abastecimiento urbano situadas en la cuenca hidrográfica de Artibai en plantaciones forestales de pino radiata, el estado de masa de cada rodal, el riesgo de erosión y la erosión de la zona.

| Nombre captación de agua | Uso de suelo | Especie forestal | Estado de masa | Riesgo de erosión (CP=1) | Erosión (CP= tabla 1) | | | |
|--------------------------|--------------|--|----------------|--------------------------|-----------------------|--------|------|----------|
| Pertike I | Forestal | Pino radiata | Fustal | Muy alto | Baja | | | |
| Pertike II | Forestal | Pino radiata | Monte bravo | Muy alto | Alta | | | |
| Beketxe III | Forestal | Pino radiata | Fustal | Muy alto | Muy baja | | | |
| Beketxe II | Forestal | Pino radiata | Fustal | Muy alto | Muy baja | | | |
| Beketxe I | Forestal | Pino radiata | Fustal | Muy alto | Muy baja | | | |
| Altzolabarri | Forestal | Pino radiata | Fustal | Alto | Muy baja | | | |
| Arrimurriaga I | Forestal | Pino radiata | Fustal | Muy alto | Muy baja | | | |
| Arrimurriaga II | Forestal | Pino radiata | Latizal | Alto | Muy baja | | | |
| Garramiola | Forestal | Pino radiata | Fustal | Muy alto | Muy baja | | | |
| Ubero Meabe | Forestal | Pino radiata | Fustal | Alto | Muy baja | | | |
| Muniategi | Forestal | Pino radiata | Tala | Muy alto | Alta | | | |
| Alcibar | Forestal | Pino radiata </tr <tr> <td>Aranbaltza</td> <td>Forestal</td> <td>Pino radiata</td> <td>Fustal</td> <td>Alto</td> <td>Muy baja</td> </tr> | Aranbaltza | Forestal | Pino radiata | Fustal | Alto | Muy baja |
| Aranbaltza | Forestal | Pino radiata | Fustal | Alto | Muy baja | | | |

Tras el cálculo de las características geomorfológicas de la cuenca, se obtuvo el área pendiente arriba de las 13 captaciones presentes en plantaciones forestales de pino radiata de Artibai (Figura 4) que varió entre 38,5 hectáreas en Aranbaltza a 0,3 hectáreas en Altzolabarri.

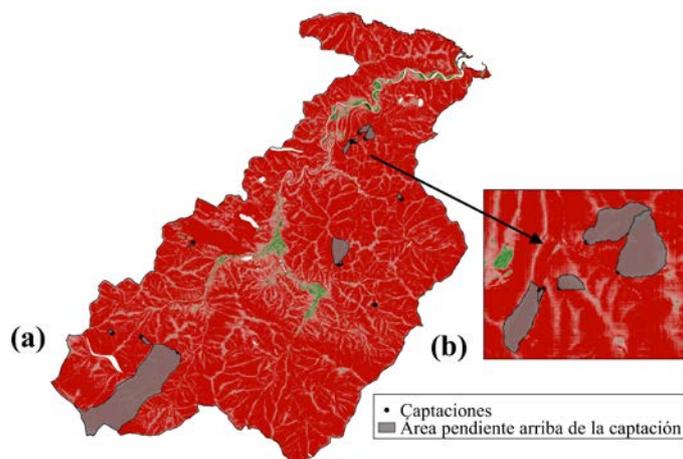


Figura4. (a) Superficies que drenan a cada una de las captaciones (área pendiente arriba) situadas en plantaciones de pino radiata de la cuenca hidrográfica de Artibai. (b) Detalle de 5 de las captaciones y sus respectivas áreas pendiente arriba.

Una vez definidas las áreas pendiente arriba de cada una de las captaciones de abastecimiento urbano, se delinearón las zonas de protección (Figura 5).

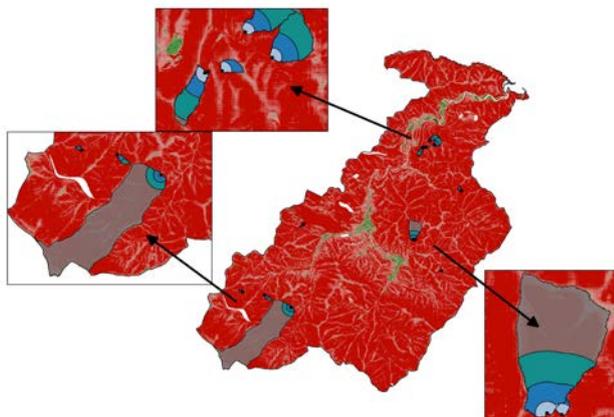


Figura5. Zonas de protección para cada una de las captaciones situadas en plantaciones de pino radiata de la cuenca hidrográfica de Artibai. Zona de especial protección en azul claro, zona de protección intermedia en azul oscuro y zona de protección lejana en verde.

4.3. Propuestas de gestión forestal para la protección de la calidad del agua y las medidas de compensación por la provisión de agua de consumo humano.

Zona de especial protección: Se propone una zona de conservación, con gestión no encaminada a la producción maderera, con un cambio paulatino del pino por frondosas y con la realización de plantaciones manuales de enriquecimiento, si fuera necesario. Se propone la prohibición de construcción de infraestructuras (vías, pistas, parques, etc.) en esta zona.

Zona de protección intermedia: En esta zona se permitirá un aprovechamiento productivo de las masas forestales con una gestión más cercana a la naturaleza realizando una gestión bajo cubierta arbórea permanente. Se propone realizar una corta por entresaca del pinar cuando llegue a edad de turno manteniendo el estrato de regenerado y realizando plantaciones manuales de enriquecimiento si fuera necesario. En la zona se propone asimismo la prohibición de construcción de infraestructuras previendo, la saca con suelo seco y mínima afección al mismo mediante animales o métodos mecánicos de bajo impacto.

Zona de protección lejana: En esta zona se permitirá un aprovechamiento y gestión similar al de la zona anterior pero se permitirá la construcción de infraestructura viaria para la realización de los aprovechamientos que se realizarán con suelo seco y mínima afección al mismo.

En la Tabla 4 se presentan las superficies de cada una de las zonas de protección en la cuenca hidrográfica de Artibai, las posibles medidas de compensación aplicables según Plan de Desarrollo Rural de Euskadi 2015-2020 y su coste anual, ya que la legislación vasca actual no contempla ninguna medida compensatoria de lucro cesante en la gestión forestal por provisión de agua. El coste anual de las ayudas a las que el propietario forestal se podría acoger según esta propuesta sería de 2234 euros para toda la cuenca hidrográfica de Artibai para estas zonas de especial protección.

Tabla 4: La extensión de cada una de las zonas de protección, las posibles medidas ambientales propuestas para compensación por servicios ecosistémicos y el coste económico anual.

| | Superficie (ha) | euros al año | Medida ambiental del PDR Euskadi - 2015-2020 | Razonamiento de intervención de la medida |
|-------------------------------|-----------------|--------------|---|--|
| Zona de especial protección | 7,52 | 2.234 | M13.1 - Pagos compensatorios en zonas de montaña. | La medida atenderá al Focus área 4.C. "Prevenir la erosión de los suelos y mejorar la gestión de los mismos", potenciando el mantenimiento sostenible de la actividad agraria en zonas tan sensibles como las de montaña. |
| Zona de protección intermedia | 22,08 | 8.780 | M15.1.2 - Sustitución de plantaciones forestales con especies alóctonas por bosques autóctonos. | La medida contribuirá a la conservación de la biodiversidad, las ventajas ambientales de la consolidación de bosques autóctonos son evidentes debido, entre otras cosas, a que las técnicas de manejo de los mismos son mucho menos impactantes sobre el medio que las habituales prácticas en las plantaciones de producción maderera de turnos cortos. |
| Zona de protección lejana | 36,85 | 14.653 | M15.1.2 - Sustitución de plantaciones forestales con especies alóctonas por bosques autóctonos. | La medida contribuirá a la conservación de la biodiversidad, las ventajas ambientales de la consolidación de bosques autóctonos son evidentes debido, entre otras cosas, a que las técnicas de manejo de los mismos son mucho menos impactantes sobre el medio que las habituales prácticas en las plantaciones de producción maderera de turnos cortos. |
| Total | 66 | 25667 | | |

5. Discusión

La cuenca hidrográfica de Artibai se caracteriza por una compleja orografía (factor LS elevado), unos suelos arcillo-limosos poco estructurados (factor K elevado) y precipitaciones altas (factor R elevado). El valor medio del factor LS para toda la Unión Europea es de 1,63 y de 2,24 para España (Panagos et al., 2015). Los valores del factor LS superiores a 25 se encontraron en sólo el 0,1% de toda la Unión Europea, principalmente en Austria, Grecia, Italia y Eslovenia. En Artibai el 5,6% de la superficie presenta valores del factor LS superiores a 25 debido a su topografía compleja, caracterizada principalmente por el relieve ondulante. Estos resultados resaltan la necesidad de estudios regionales con mayor resolución para que las herramientas de gestión del territorio sean útiles. Los elevados valores del factor K ($0,039 \pm 0,002 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) por encima de la media Europea ($0,032 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) según Panagos (2014) resaltan la vulnerabilidad intrínseca a la erosión de los suelos de la cuenca hidrográfica de Artibai. Sin embargo, habría que tener en cuenta que en este estudio no se ha incorporado el efecto protector de los afloramientos rocosos (información no disponible) que según Panagos et al. (2014) reduce de media un 15% el valor del factor K. Asimismo, los elevados valores del factor R ($2058 \pm 62 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$) muy superior a la media Europea, que se estima en $722 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Panagos et al., 2015) reflejan la necesidad de revisar la información para el factor R disponible de las estaciones de precipitación de la CAPV. La validación de los resultados obtenidos con la Base de Datos de Erosividad de las Precipitaciones a Escala Europea (REDES) de la Comisión Europea puede ser una opción de verificación de los resultados presentados. Aun así, la combinación de los factores LS, R y K obtenidos en este estudio se traduce en que el 53% de la cuenca de Artibai tiene un riesgo de erosión muy alto. En este contexto, el papel de la cubierta forestal es de vital importancia.

La cubierta forestal de la cuenca de Artibai se compone en su mayoría por plantaciones en estado fustal y por ello la cuenca presenta una erosión muy baja (Figura 3 derecha) Estas formaciones forestales aportan por un lado estabilidad al suelo incrementando la resistencia o la cohesión del suelo gracias a su sistema radicular (Stokes et al., 2009) y grandes cantidades de materia orgánica (MO) en forma de hojarasca al suelo por otro Esta hojarasca se va descomponiendo y se incorpora al suelo mineral en forma de materia orgánica particulada (POM) que favorece la formación de macroagregados (Six et al., 2000) que a su vez favorecen la infiltración del agua en el perfil del suelo aumentando su resistencia a la erosión (Pikul & Zuzel, 1994). Gartzia-Bengoetxea et al. (2009c) resaltan que las plantaciones adultas de pino radiata de la zona presentan valores de materia orgánica del suelo, agua útil (AWC) o el intervalo de contenido de agua en suelo donde las limitaciones al crecimiento vegetal son mínimas (en inglés Least Limiting Water Range: LLWR) muy similares a formaciones forestales semi-naturales de haya y roble, siendo por lo tanto muy similar el papel protector contra la erosión que ofrecen al suelo Sin embargo, en la figura 3 derecha, resaltan en rojo los rodales en estado de repoblado con una estimación de pérdida de suelo muy superior a las $50 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ establecida como límite para definición de zonas con alto riesgo erosivo en el Plan Territorial Sectorial Agroforestal de Euskadi. El fomento de medidas para preservar los suelos forestales por el empleo de métodos de bajo impacto durante la explotación forestal, transporte y regeneración (uso de medios manuales en lugar de mecánicos, por ejemplo) resulta de mayor interés en zonas de riesgo de erosión elevado.

Según Astillero-Pinilla et al. (2012), de la comarca de Salud Pública de Gernika-Lea Artibai, la mejor opción para garantizar un suministro de agua segura y de calidad es establecer un plan de control y gestión en los abastecimientos orientado a la prevención de los riesgos. En este estudio

46 presentamos una metodología de prevención de riesgos para la calidad del suministro de agua de
47 consumo urbano mediante una gestión forestal sostenible. La definición de las zonas de especial
48 protección, de protección intermedia y protección lejana se propone como herramienta útil para tal
49 fin. Deck en 2008 propone una delimitación similar que ya se está implementando en los Alpes
50 franceses y suizos. Las Directrices de la Norma Forestal del Reino Unido también incorporan zonas de
51 especial protección de, por lo menos, 50 metros desde el punto de captación de agua de
52 abastecimiento urbano (Forestry Commission, 2011). El Consejo Regional de Greater Wellington de
53 Nueva Zelanda ha desarrollado en 2015 una metodología para delinear zonas de protección para las
54 captaciones de agua potable. La implementación de la metodología propuesta en este estudio en las
55 13 captaciones de abastecimiento urbano situadas en plantaciones de pino radiata en la cuenca
56 hidrográfica de Artibai supondría la delimitación de 66 hectáreas de terreno forestal para la
57 protección del agua. Esta superficie supone un 0,6% de la superficie total de la cuenca y 1% de las
58 plantaciones forestales de pino radiata.

59

60 **6. Conclusiones**

61

62

63 Los resultados de este estudio resaltan la necesidad de estudios regionales con mayor
64 resolución para que las herramientas de gestión del territorio sean útiles y poder identificar zonas de
65 riesgo de erosión de suelo con mayor precisión. Asimismo, el estudio resalta el papel de la cubierta
66 forestal en la protección del suelo ya que las plantaciones forestales en estado latizal o fustal reducen
67 la erosión significativamente. Sin embargo, salen a la luz los periodos críticos para la protección del
68 suelo en este tipo de plantaciones forestales gestionadas con cortas a hecho. El fomento de medidas
69 para preservar los suelos forestales por el empleo de métodos de bajo impacto durante la explotación
70 forestal, transporte y regeneración (uso de medios manuales en lugar de mecánicos, por ejemplo)
71 resulta de mayor interés en zonas de riesgo de erosión elevado.

72 La metodología propuesta para la delimitación de zonas de protección para la calidad del agua
73 de abastecimiento urbano y las pautas de gestión forestal para dichas zonas podrían suponer un
74 avance en la gestión integral de las cuencas hidrográficas con orografías complejas como la del río
75 Artibai. Asimismo, el sistema de compensación por la provisión de agua de consumo humano se
76 considera totalmente asumible dentro de los presupuestos del PDR de la CAPV. Aun así, la
77 implementación real en campo de esta propuesta se considera necesaria para probar su idoneidad y
78 traslado a otras cuencas hidrográficas.

79

80 **7. Agradecimientos**

81

82 Este estudio ha sido financiado por el proyecto PLURIFOR: Planes transnacionales para la
83 gestión de los riesgos forestales (Interreg V SUDOE) y cofinanciado por el Departamento de
84 Departamento de Desarrollo Económico e Infraestructuras del Gobierno Vasco.

85

86 **8. Bibliografía**

87

88 ARTETXE ARRIEN, A.; DEL HIERRO CEREZO, O.; PINTO TOBALINA, M.; GARTZIA-BENGOETXEA, N.; ARIAS-
89 GONZÁLEZ, A.; 2014. Sumideros de carbono de la Comunidad Autónoma del País Vasco. Vitoria-
Gasteiz. 212 pp.

90 ASTILLERO PINILLA, M.J.; ELORTEGI GABIKAGOGEASKOA, A.; GARCÍA VÁZQUEZ, R.; PALANCA CAÑÓN,
91 D. 2012. Planes de seguridad del agua. Análisis de peligros y evaluación de los riesgos en un
92 abastecimiento de Bizkaia. Aplicación a una captación. Revista de Salud Ambiental 12(2), 122-125.

- 93 DECK, C. 2008. Forest management and drinking water: Case studies and recommendations. Interreg
94 project "Alpeau.
- 95 DESMET, P. J. J.; GOVERS, G.; 1996. Comparison of Routing Algorithms for Digital Elevation Models
96 and Their Applications for Predicting Ephemeral Gullies. International Journal of GIS. 10, 311-331.
- 97 EC, 2006. COM 2006/231, 2006. Communication from the Commission to the Council, the European
98 Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions.
99 Thematic Strategy for Soil Protection. Commission of the European Communities. Brussels,
100 22.9.2006, 12.pp
- 101 FIQUEPRON, J; PICARD, O; BANSEPT, A; TOPPAN, E; 2015. Woodlands for drinking water: beste
102 management practices and partnerships. In: Arias-González, A. y Gartzia-Bengoetxea, N (Eds.) Soil
103 degradation risks in planted forests. Vitroia-Gasteiz. 167pp. Legal record: VI 410-2015
- 104 FORESTRY COMMISSION, 2011. Forests and water. UK Forestry Standard Guidelines. Forestry
105 Commission, Edinburgh. 1-80 pp
- 106 GARTZIA-BENGOETXEA, N.; GONZÁLEZ-ARIAS, A.; KANDELER, E.; MARTÍNEZ DE ARANO, I.; 2009A.
107 Potential indicators of soil quality for temperate forest ecosystems: A case study in the Basque
108 Country. Annals of Forest Science 66, 303p1-p12
- 109 GARTZIA-BENGOETXEA, N.; GONZÁLEZ-ARIAS, A.; MARTÍNEZ DE ARANO, I; 2009B. Effect of tree
110 species and clear-cut forestry on forest floor in adjacent temperate forests in northern Spain.
111 Canadian Journal of Forest Research 39, 1302-1312
- 112 GARTZIA-BENGOETXEA, N.; GONZÁLEZ-ARIAS, A.; MERINO, A.; MARTÍNEZ DE ARANO, I.; 2009C. Soil
113 organic matter in soil physical fractions in adjacent semi-natural and cultivated stands in temperate
114 Atlantic forests. Soil Biology and Biochemistry 41, 1674-1683
- 115 GARTZIA-BENGOETXEA, N.; GONZALEZ-ARIAS, A.; ONAINDIA, M.; MARTÍNEZ DE ARANO, I.; 2006. The
116 effect of site preparation on water and soil protection in *Pinus radiata* plantations in the Basque
117 Country. Congreso Internacional del Bosque Cultivado. Bilbao.
- 118 GONZÁLEZ-ARIAS, A.; MARTÍNEZ DE ARANO, I.; 2005. Presiones de uso de las actividades forestales
119 sobre los Cursos de Agua de la CAV. Technical report.
- 120 GWRC, 2015. Delineation of drinking water supply catchment protection zones. Method to support the
121 Proposed Natural Resources Plan.
- 122 LÓPEZ-VICENTE, M.; PÉREZ-BIELSA, C.; LÓPEZ-MONTERO, T.; LAMBÁN, L.J.; NAVAS, A.; 2014. Runoff
123 simulation with eight different flow accumulation algorithms: Recommendations using a spatially
124 distributed and open-source model. Environmental Modelling & Software 62, 11-21.
- 125 OLARIETA, J.R.; 2003. Evaluación del territorio y ordenación de usos agrarios en la comarca de Lea-
126 Artibai. PhD
- 127 PANAGOS, P.; BALLABIO, C.; BORRELLI, P.; MEUSBURGER, K.; KLIK, A.; ROUSSEVA, S.; PERČEC TADIĆ,
128 M., MICHAELIDES, S.; HRABALÍKOVÁ, M.; OLSEN, P.; AALTO, J.; LAKATOS, M.; RYMSZEWICZ, A.;
129 DUMITRESCU, A.; BEGUERÍA, S.; ALEWELL, C.; 2015. Science of the Total Environment 511, 801-814

- 130 PANAGOS, P.; BORRELLI, P.; MEUSBURGER, K.; 2015. A New European Slope Length and Steepness
131 Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water. *Geosciences* 5, 117-126.
- 132 PANAGOS, P.; MEUSBURGER, K.; BALLABIO, C.; BORRELLI, P.; ALEWELL, C.; 2014. Soil erodibility in
133 Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS. *Science of the Total Environment* 479–480, 189–
134 200.
- 135 PIKUL, J.L.; ZUZEL, J.F.; 1994. Soil crusting and water infiltration affected by long-term tillage and
136 residue management. *Soil Science Society of America Journal* 58, 1524-1530.
- 137 SCHMIDT, K.M.; ROERING, J.J.; STOCK, J.D.; DIETRICH, W.E.; MONTGOMERY, D.R.; SCHAUB, T., 2001.
138 Root cohesion variability and shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range. *Canadian*
139 *Geotechnical Journal* 38, 995-1024.
- 140 SIDLE, R.C.; PEARCE, A.J.; O' LOUGHLIN, C.L., 1985. Hillslope stability and land use. *Water Resources*
141 *Monograph* 11: 140 pp.
- 142 Six, J., Elliott, E.T., Paustian, K., 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a
143 mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry* 32, 2099–
144 2103.
- 145 SIX, J.; CONANT, R.T.; PAUL, E.A.; PAUSTIAN, K.; 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter:
146 Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil* 241, 155-176.
- 147 STOKES, A.; ATGER, C.; BENGOUGH, A.G.; FOURCAUD, T.; SIDLE, R.C.; 2009. Desirable plant root traits
148 for protecting natural and engineered slopes against landslides. *Plant Soil* 324, 1–30
- 149 VAN DER KNIJFF, J.M.; JONES, R.J.A.; MONTANARELLA, L.; 2000. Soil erosion risk assessment in
150 Europe. EUR 19044 EN. European Commission.
- 151 WANG, T.; HAMANN, A.; 2012. ClimateEU v4.63. A program to generate climate annual, seasonal and
152 monthly data for Europe.
- 153 WISCHMEIER, W.; SMITH, D.; 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation
154 Planning; *Agricultural Handbook No. 537*; USDA, Science and Education Administration:Hyattsville,
155 MD, USA.
- 156 WU, T. H.; McKINNELL, W. P. III; SWANSTON, D. N.; 1979. Strength of tree roots and landslides on
157 Prince of Wales Island, Alaska. *Canadian Journal of Geotechnical Research* 16(1), 19-33