



Desarrollo de herramientas para prevenir y gestionar los riesgos en la costa ligados al cambio climático

**Actividad E.3.1.3 Cartografía en formato A3 de zonas vulnerables de erosión en laderas y cauces.
Propuesta de actuación.**

Informe del GT3: Desarrollo de herramientas de gestión basadas en el estudio integrado de la dinámica fluvial y costera

Due date of deliverable: 30/09/2020

Actual submission date: 20/02/2021

Lead contractor for this deliverable: UGR

Autores

Marina Cantalejo, Agustín Millares Valenzuela, Manuel Cobos Budía, Asunción Baquerizo Azofra, Rosa María Mateos, Jorge Pedro Galve Arnedo, Juan Antonio Luque Espinar, Cristina Reyes Carmona, Oriol Monserrat

Project funded by the Interreg Sudoe Programme through the European Regional Development Fund (ERDF).



Índice

1. INTRODUCCIÓN.	3
2. CÁLCULO DISTRIBUIDO Y FÍSICO DE PROCESOS EROSIVOS	4
2.1 CIRCULACIÓN PRIMARIA.	4
2.2 CIRCULACIÓN SECUNDARIA:	5
3 EVALUACIÓN DE ESCENARIOS EROSIVOS Y SEDIMENTARIOS EN LA CUENCA DEL RÍO GUADALFEO (GRANADA)	7
3.1 Comparación de las simulaciones en condiciones actuales y con cambio climático.	7
3.2 Evaluación de los cambios producidos en el flujo de sedimento. Impacto en las infraestructuras hidráulicas.	12
4 PROPUESTA DE ACTUACIONES DE ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN	15
5 REFERENCIAS.	17
ANEJO 1: Resumen de los resultados de las simulaciones.	19
ANEJO 2: Cartografía en formato A3 de zonas vulnerables de erosión en laderas.	20

1. INTRODUCCIÓN.

El Grupo de Trabajo 3 (GT3), del proyecto RISKCOAST, centra su actividad en la elaboración de herramientas que permitan obtener un pronóstico del comportamiento hidrológico, erosivo y sedimentario de la cuenca en un contexto de cambio climático y establecer estrategias de adaptación y mitigación de los efectos adversos sobre las infraestructuras existentes a lo largo de la red fluvial y en la costa.

La Actividad 3.1.3, centra sus objetivos en la elaboración de cartografía que permita localizar zonas vulnerables a la erosión o sedimentación dentro de la cuenca de estudio, con la consiguiente propuesta de medidas.

La zona evaluada corresponde con la cabecera de la cuenca del río Guadalfeo (541 km²), donde el curso fluvial no se encuentra regularizado. Esta zona permite, además, evaluar la interacción del sedimento con las infraestructuras hidráulicas presentes en la cuenca, como es el caso de la presa de Rules, cuyas últimas estimaciones apuntan a una disminución de su capacidad por la acumulación de sedimento en la cola del embalse (Millares et al, 2014b).

Los mapas que se muestran como resultado de la caracterización del comportamiento erosivo-sedimentario de la cuenca (ANEJO 2), provienen de la metodología llevada a cabo en la actividad E.3.1.1, del cual se hace un breve recordatorio.

Para evaluar el impacto del cambio climático en el comportamiento erosivo-sedimentario de la cuenca, se ha empleado el modelo hidrológico de base física distribuido WiMMed (Herrero et al, 2014), forzado con series de entrada la precipitación y temperatura correspondiente a un periodo actual (1998 -2014) y a un periodo futuro (2085 -2100). Los datos de dichas proyecciones futuras corresponden al modelo SMHI_IPSL-IPSL-CM5A-MR, del cual se han evaluado dos escenarios: El RCP 4.5 correspondiente a un escenario más moderado y el RCP 8.5 con unas proyecciones más desfavorables.

2. CÁLCULO DISTRIBUIDO Y FÍSICO DE PROCESOS EROSIVOS

Esta actividad se centra en evaluar la respuesta erosiva de la cuenca de estudio en diferentes contextos de cambio climático. Los procesos involucrados en la erosión son diversos y sus interacciones complejas, siendo difícil modelar cada uno de ellos a escala de cuenca. La erosión por impacto de gota de lluvia y por surco se consideran los dos procesos predominantes en el modelado del comportamiento erosivo-sedimentario a escala de cuenca. (Nearing et al, 1989; Merrit et al, 2003). El modelo de base física distribuido WiMMed (Herrero et al, 2014) incorpora las ecuaciones teóricas que modelan estos dos procesos.

Se distinguen dos formas de generación de sedimento: La primaria, asociada a la red de surcos y el efecto del impacto de la gota de lluvia dentro de la propia celda, y la secundaria, producida por la escorrentía existente en la circulación secundaria.

2.1 CIRCULACIÓN PRIMARIA.

- Erosión por impacto de gota de lluvia (erosión interrill):

La generación de sedimento por impacto de gota de lluvia depende de una gran cantidad de parámetros, siendo la intensidad de la lluvia, el diámetro de la gota y la pendiente, las variables más empleadas por los modelos. La formulación empleada, por el modelo hidrológico WiMMed, para la estimación de la generación de sedimento por impacto de gota de lluvia corresponde con la siguiente ecuación. (Elliot et al, 1989)

$$e_{i_t} = K_i f^2 S_f$$

Donde e_{i_t} , es la erosión en zonas entre surcos ($\frac{kg \cdot s}{m^2}$) durante el periodo Δt , K_i es el parámetro de la erodibilidad de las zonas situadas entre surcos ($\frac{kg \cdot s}{m^4}$), f^2 es la intensidad de la lluvia ($\frac{m}{s}$) y S_f es el factor de la pendiente.

- Erosión en surco (erosión rill):

El esfuerzo cortante que ejerce el flujo concentrado en el suelo produce la incisión responsable de la generación de surcos, y por tanto, movilización del material que es arrastrado por el flujo de escorrentía superficial.

El modelado de la erosión en la zona de surco se ha realizado bajo la aproximación de (Foster et al, 1995; Morgan, et al, 1998)

$$e_{r1} = K_{r1} (\tau_{r1} - \tau_{cr1}) \left(1 - \frac{Q_{sr1}}{T_{cr1}}\right)$$

Donde e_{r1} , representa la generación primaria de sedimento en zonas de surcos ($\frac{kg \cdot s}{m^2}$), K_{r1} es la erodibilidad primaria del suelo ($\frac{s}{m}$), τ_{r1} y τ_{cr1} son el esfuerzo cortante y el esfuerzo cortante crítico de la generación primaria en un surco ($\frac{kg \cdot s^2}{m}$), Q_{sr1} es la descarga unitaria de sedimento ($\frac{kg \cdot s}{m}$), y T_c es la capacidad de transporte del flujo ($\frac{kg \cdot s}{m}$).

Calculado el sedimento correspondiente a la generación primaria para un Δt , se calcula la cantidad total que se transfiere a la circulación secundaria.

$$E_1 = e_{i1} \cdot A_i + e_{r1} \cdot A_r$$

Donde E_1 , es el sedimento generado en la celda ($\frac{kg \cdot s}{m^2}$), e_r es el sedimento generado por concentración del flujo en surco ($\frac{kg \cdot s}{m^2}$) y e_i es el sedimento generado por impacto de gota de lluvia en la zona entre surco ($\frac{kg \cdot s}{m^2}$) para el intervalo Δt . A_i y A_r , corresponden respectivamente con el área efectiva por impacto de gota de lluvia y zona de surco.

2.2 CIRCULACIÓN SECUNDARIA:

La red de circulación secundaria se encarga de la distribución del agua y sedimento generado en cada celda a lo largo de la ladera hasta la red de ríos, teniendo en cuenta el efecto erosivo del flujo. A esta red se le va añadiendo el sedimento producido en cada celda por la generación primaria, teniéndose en cuenta el balance generación - circulación - deposición a lo largo de la red de drenaje de ladera.

El cálculo de la erosión secundaria generada por la circulación en ladera se calcula de la misma manera que la generación primaria, mediante la fórmula de (Foster et al, 1995).

$$e_{r2} = K_{r2} (\tau_{r2} - \tau_{cr2}) \left(1 - \frac{Q_{sr2}}{T_{cr2}}\right)$$

Donde e_{r2} , representa la generación primaria de sedimento en zonas de surcos ($\frac{kg \cdot s}{m^2}$), K_{r1} es la erodibilidad primaria del suelo ($\frac{s}{m}$), τ_{r2} y τ_{cr2} son el esfuerzo cortante y el esfuerzo cortante crítico de la generación primaria en un surco ($\frac{kg \cdot s^2}{m}$), Q_{sr2} es la descarga unitaria de sedimento ($\frac{kg \cdot s}{m}$), y T_{cr2} es la capacidad de transporte del flujo ($\frac{kg \cdot s}{m}$) para esa red secundaria.

Calculado el sedimento generado a partir de la circulación secundaria, se añade la carga correspondiente a la circulación primaria para el intervalo de tiempo Δt y se calcula la cantidad total que se transfiere a la circulación secundaria de la forma:

$$E_2 = E_1 + e_{r2} \cdot A_c$$

Donde E_2 , es el sedimento generado en la celda ($\frac{kg \cdot s}{m^2}$), E_1 , es el sedimento generado en la celda ($\frac{kg \cdot s}{m^2}$) por generación primaria, e_{r2} es el sedimento generado por concentración del flujo en canal ($\frac{kg \cdot s}{m^2}$) y $A_c(m^2)$, es la fracción de área correspondiente al canal (%).

La carga de sedimento se actualiza para la red secundaria mediante la expresión:

$$Q_{sol} = E_2 * \frac{W^2}{q2}$$

Donde $Q_{sol} (\frac{kg}{m^3})$ es el valor positivo (erosión) o negativo (depósito) que caracteriza el flujo erosivo de cada celda de ladera y a partir del cual se obtiene el sedimentograma en el punto de cierre seleccionado.

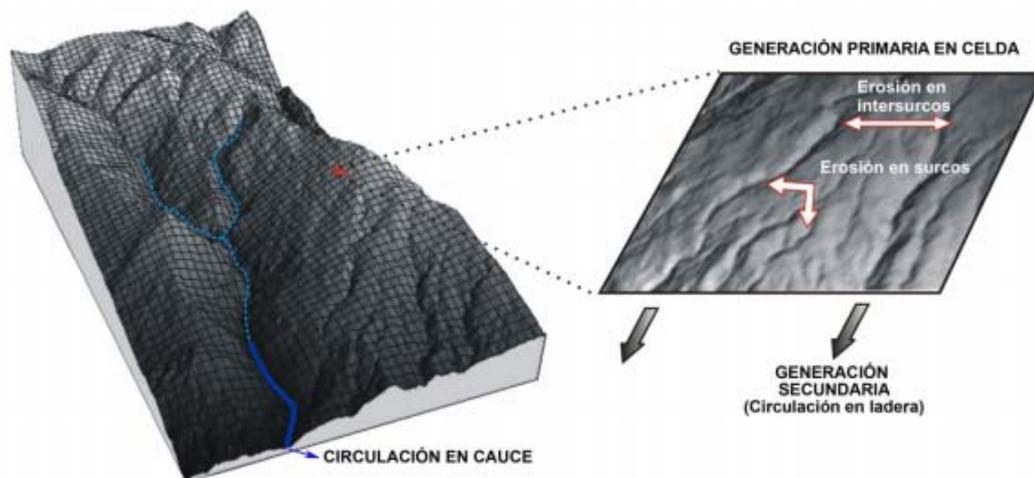


Figura 1_Representación esquemática de la generación de sedimentos en ladera implementada en WiMMed. (Manual base teórica, 2009).

3 EVALUACIÓN DE ESCENARIOS EROSIVOS Y SEDIMENTARIOS EN LA CUENCA DEL RÍO GUADALFEO (GRANADA)

Antes de proceder a interpretar los resultados obtenidos por el modelo hidrológico, resaltar que, para el periodo de simulación futuro 2085 – 2100, no se ha considerado los cambios previsibles en los usos del suelo o en la cobertura vegetal, así como cualquier otro parámetro característico del suelo o de sus propiedades.

3.1 Comparación de las simulaciones en condiciones actuales y con cambio climático.

Los resultados mostrados por los mapas (ANEJO 2) representan celda a celda la cantidad de sedimento generado por la erosión primaria y su movimiento por la red de generación secundaria, en donde se realiza el cálculo del balance generación – circulación- sedimentación a lo largo de la ladera hasta alcanzar el río.

Dentro de los dos procesos considerados en el cálculo de la generación de sedimento, la erosión rill representa un 98% de la erosión total, frente a la erosión originada por impacto de gota de lluvia (2%) para el periodo de simulación 1999 – 2014.

Al comparar el comportamiento erosivo de la cuenca en los dos escenarios de cambio climático (2085 – 2100) frente al periodo de referencia actual (1998 – 2014), se aprecia un aumento de la erosión acumulada, del 87 % para el RCP 4.5 y del 30% para el RCP 8.5. A pesar de que se sigue conservando la proporción de sedimento generado por cada proceso, cabe destacar el aumento sufrido por la erosión interrill (por impacto de gota de lluvia), en un 221% para el RCP 4.5 y un 180 % para el RCP 8.5. En la siguiente tabla se resumen la pérdida de suelo media anual en Ton/año en toda la cuenca para el periodo de simulación.

Tabla 1_ Valores anuales medios de pérdida de suelo en [Ton/año] en toda la cuenca para el periodo de simulación correspondiente. Entre paréntesis, el porcentaje correspondiente a la erosión total.

[Ton/año]	Registro histórico (1999 – 2014)	RCP 4.5 (2085 – 2100)	RCP 8.5 (2085 – 2100)
Erosión total	2,73E+08	5,10E+08	3,55E+08
Erosión Rill	2,68E+08 (98%)	4,94E+08 (97%)	3,41E+08 (96%)
Erosión Interill	5,03E+06 (2%)	1,62E+07 (3%)	1,41E+07 (4%)

En la siguiente tabla se expresa lo mismo que la anterior, pero en valores promedio por ha.

Tabla 2_ Valores de erosión media anual por ha (Ton/ (ha x año) para el periodo de referencia (1998 - 2015) y el periodo de impacto (2085 -2100). Entre paréntesis, variación sufrida entre el periodo de referencia y el periodo de impacto.

[Ton/ (ha x año)]	Registro histórico (1999 – 2014)	RCP 4.5 (2085 – 2100)	RCP 8.5 (2085 – 2100)
Erosión total	5039.33	9424.32 (87%)	6567.69 (30%)
Erosión Rill	4946.33	9125.32 (84%)	6307.54 (27%)
Erosión Interill	92.99	298.997 (221%)	260.153 (180%)

Este comportamiento contrasta con el de la precipitación (ver Tabla 3) en donde se estima una disminución del 31% para el escenario RCP 8.5 y un leve aumento (del 1.8%) para el RCP 4.5.

Tabla 3_ Valores de precipitación media anual (mm/año) para el periodo de referencia (1998 – 2015) y el periodo de impacto (2085 – 2100).

[mm / año]	Registro histórico (1999 – 2014)	RCP 4.5 (2085 – 2100)	RCP 8.5 (2085 – 2100)
Precipitación	738,7	752,0	509,4

Para explicar el aumento de la erosión en escenarios futuros, donde las predicciones apuntan a una disminución de la precipitación anual, se analizan los siguientes aspectos:

- El cambio experimentado por los parámetros que más influyen en el cálculo de la erosión.
- Los cambios producidos en la cobertura del suelo. Al no haber introducido ninguna variación en los usos del suelo o en sus propiedades, la única variable climatológica que está influyendo en la cobertura del suelo es la nieve.

A pesar de que las predicciones apuntan a una disminución generalizada de las precipitaciones, la forma en la que llueve es determinante para la movilización de sedimento. Se espera que la intensidad de los eventos de precipitación aumente entre un 14,5% (RCP 4.5) y un 6,9% (RCP8.5), influyendo significativamente en el cálculo de la producción de sedimento.

Además, la disminución de la precipitación y el aumento de la temperatura conlleva un descenso importante de la cobertura permanente de nieve en cualquiera de los escenarios analizados. Al disminuir la precipitación en forma de nieve, se pierde el efecto laminador en los eventos, conllevando un aumento de la escorrentía superficial y por tanto del hidrograma asociado. Además, al disminuir dicha cobertura de nieve, una mayor proporción de terreno queda expuesto, y al tratarse de una zona con orografía pronunciada, la tasa de erosión aumenta para los escenarios en condiciones de cambio climático.

En las siguientes figuras (Figura 2, Figura 3, Figura 4) se muestra las variaciones espaciales sufridas por la erosión total, junto con los agentes hidrometeorológicos que están afectando a su comportamiento. Cabe destacar siguientes cambios:

- La Sierra de la Contraviesa presenta valores de tasa de erosión de hasta (200 t/ha año) (Millares, et al 2018), siendo la zona que más contribuye a la producción de sedimento de toda el área de estudio. Las predicciones realizadas en el informe E.3.1.1 apunta a una disminución significativa de las precipitaciones, en esta zona, en torno a -300 mm/año, y por ende de la erosión (ver figuras 2,3,4) teniendo poca influencia los cambios comentados en la cobertura de la nieve en esta zona en particular.
- En las zonas más elevadas de la cuenca (> 1500 m), correspondiente a la zona de Sierra Nevada, se experimentan incrementos de la tasa erosiva anual debido a las predicciones comentadas sobre el cambio drástico en la cobertura de la nieve de aquí a finales de siglo y el aumento de la intensidad de los eventos.

REGISTRO HISTÓRICO. Valores medios anuales para el periodo simulación(1999 - 2014)

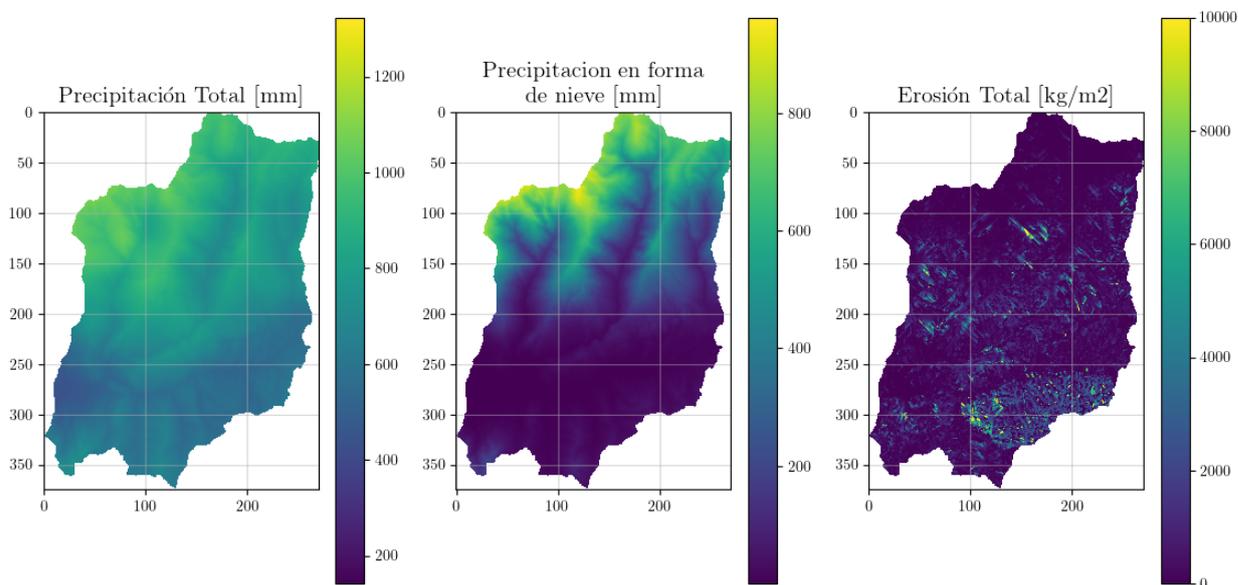


Figura 2_ Variación media anual de la precipitación (mm), la precipitación en forma de nieve (mm) y la erosión total (kg/m2) para el periodo de referencia (1999 – 2014)

RCP 4.5. Valores medios anuales para el periodo simulación (2085 - 2100)

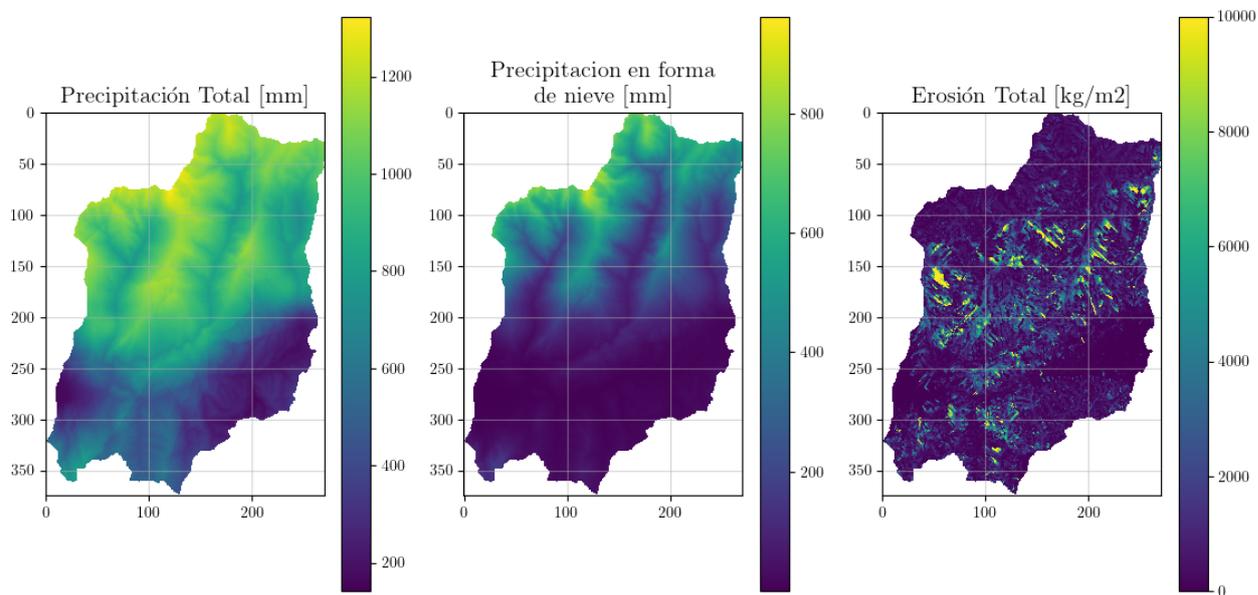


Figura 3_ Variación media anual de la precipitación (mm), la precipitación en forma de nieve (mm) y la erosión total (kg/m2) para el escenario de cambio climático RCP 4.5 (2085 – 2100).

RCP 8.5.Valores medios anuales para el periodo simulación (2085 - 2100)

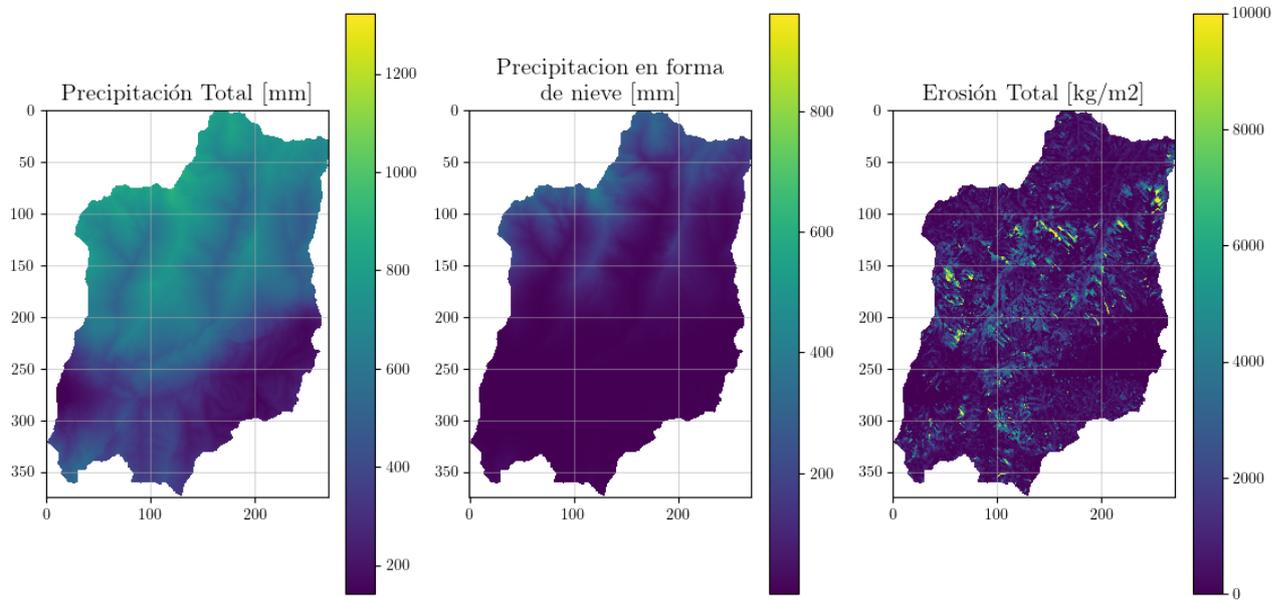


Figura 4_ Variación media anual de la precipitación (mm), la precipitación en forma de nieve (mm) y la erosión total (kg/m2) para el escenario de cambio climático RCP 8.5 (2085 – 2100).

3.2 Evaluación de los cambios producidos en el flujo de sedimento. Impacto en las infraestructuras hidráulicas.

A continuación, se analiza el impacto de los resultados de los mapas distribuidos de la erosión, en el caudal de sedimento que circula por el río. La estación sobre la que se refieren los resultados es la 110 (localizada en Órgiva), situada a la salida de la cuenca y permitiendo estimar la contribución de sedimento en la cola del embalse de Rules.

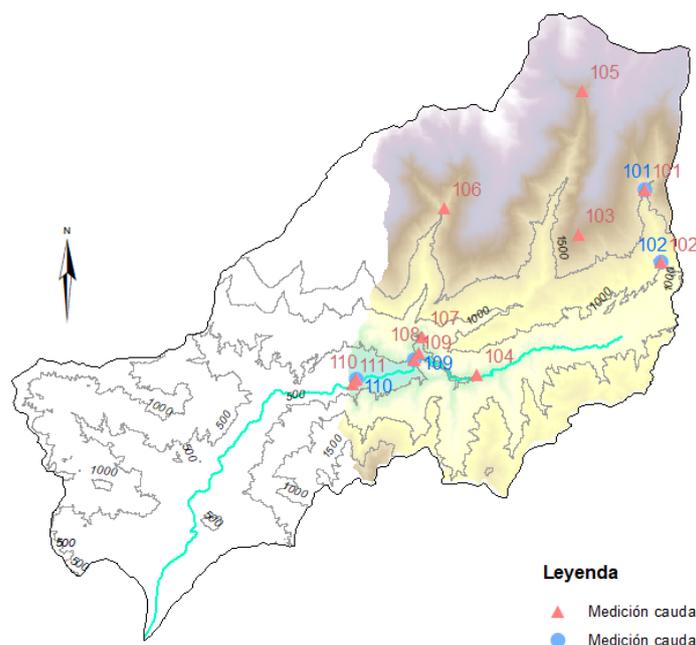


Figura 5_ Localización de los puntos donde se evalúa el flujo de agua (azul) y sedimento (rojo). Escala: 1:300.000

Tabla 4_ Volumen de sedimento (hm³) anual registrado de media en el punto de control 110 para el periodo de simulación indicado. Entre paréntesis, el incremento anual medio respecto del periodo de referencia (1998 – 2015)

Media anual [hm ³ / año]	Registro histórico (1999 – 2014)	RCP 4.5 (2085 – 2100)	RCP 8.5 (2085 – 2100)
Volumen de sedimento	0,1724	0,3278 (90%)	0,2275 (31%)

En la tabla anterior se deja indicado la contribución de sedimento media anual (hm³/año) a la salida de la cuenca (punto 110), para cada uno de los periodos simulados. Esto se traduce en una aportación al final de cada de periodo de simulación de 2,7596 hm³ (registro histórico), 5,2450 hm³ (RCP 4.5) y 3,6403 hm³ (RCP 8.5).

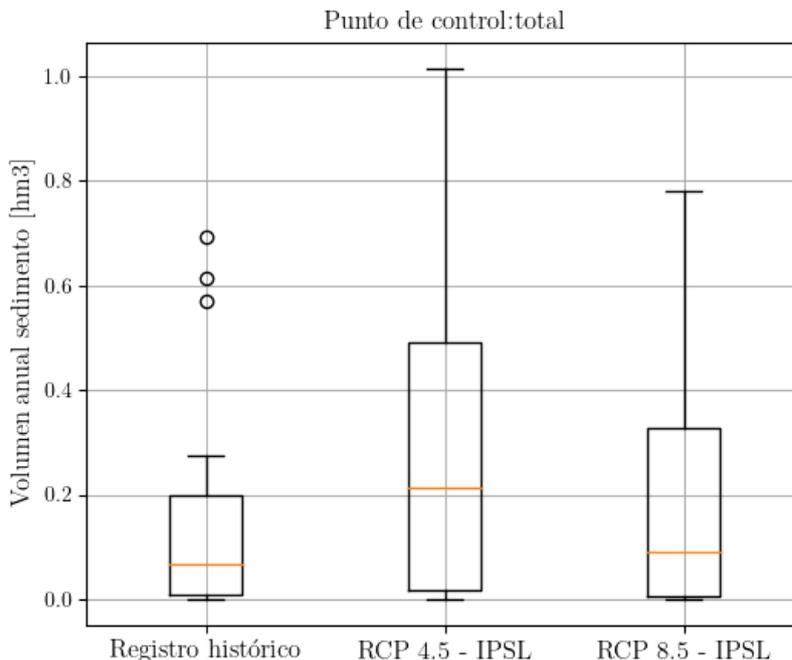


Figura 6_ Gráfico de cajas. Volumen de sedimento anual [hm³] registrado en el punto de control 110.

En la Figura 6, se muestra la distribución de los datos del volumen anual de sedimento (hm³) a la salida de la cuenca de estudio (punto 110), para los diferentes escenarios. Hay un aumento significativo de la variabilidad de la aportación de sedimento anual, manteniéndose los valores del percentil 25 para los años en los cuales se produce poca erosión, y habiendo un aumento significativo del percentil 75 % (para el RCP 4.5 del 152 % y para el RCP 8.5 del 66%). En el caso del percentil 50%, este pasa de estar próximo a 0,06 hm³ a alcanzar valores de 0,21 hm³ (RCP 4.5) y 0,092 hm³ (RCP 8.5).

No se pueden explicar estos resultados del aumento de la tasa de transporte a través solamente de las aportaciones anuales recibidas en el punto de salida, puesto que, disminuyen para el RCP 8.5 (-50%) y aumentan para el RCP 4.5(+14%), al igual que ocurre con la precipitación anual en la zona de estudio (ver Tabla 3Tabla 4).

Como se ha mencionado en apartados anteriores, hay dos factores que están condicionando este aumento en la movilización de sedimento en la cuenca: La intensidad de los eventos de precipitación y la exposición del terreno en la zona más elevada de la cuenca.

- En el escenario RCP 4.5, la precipitación anual media se mantiene respecto al periodo de referencia (ver Tabla 3) sin embargo, las aportaciones en el punto de salida sufren un aumento debido a los cambios experimentados por la precipitación en forma de nieve y fusión (Tabla 5). Además, se registra un aumento de la intensidad de los eventos de un 14,57 % que contribuye, junto con la disminución de la cobertura de nieve (8,24 %), al aumento de la producción de sedimento para este escenario.
- En el escenario RCP 8.5, las condiciones son distintas. La precipitación media anual en la cuenca desciende (Tabla 3), junto a la contribución de las aportaciones que se ven afectadas por el descenso drástico también de la precipitación en forma de nieve y su fusión (Tabla 5). Al igual que en el caso anterior, se experimenta un aumento de la intensidad de los eventos en un 6,56%, que acompañado de la disminución de la cubierta de nieve (73%), favorece el aumento de la tasa de erosión en la parte más alta de la cuenca.

En la siguiente figura se muestran las funciones de distribución asociadas a los caudales diarios de sedimento transportado por el río, cuando se producen avenidas por encima de los 30 m³/s. Se puede observar como el escenario RCP 8.5 presenta una mayor probabilidad de excedencia del caudal de sedimento diario para este tipo de avenidas, frente al caudal de sedimento movilizado para los escenarios RCP 4.5 y registro histórico. Esto pone de manifiesto que, a pesar de llover menos, el aumento de la intensidad media de los eventos en un 6,56 % y la disminución de la cobertura de nieve en un 73 %, está favoreciendo que los pulsos de caudal de sedimento (kg/día) asociado a los eventos sean más intensos en el RCP 8.5.

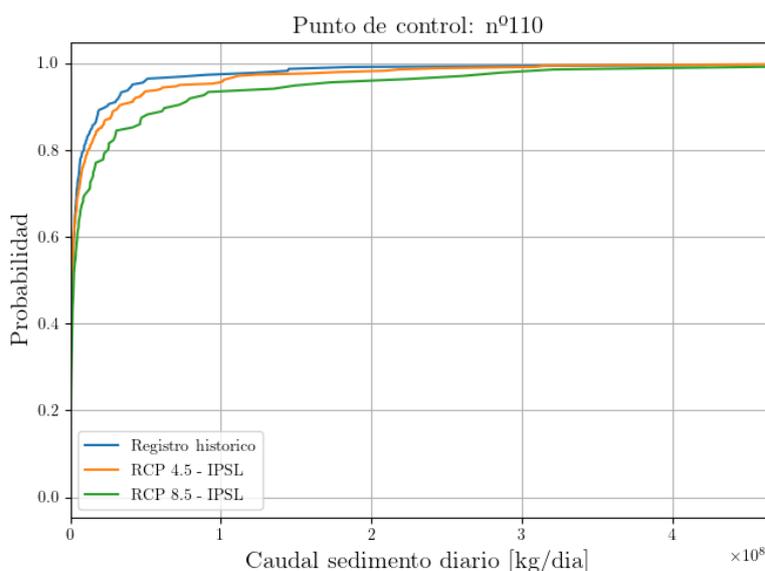


Figura 7_ Funciones de distribución del caudal de sedimento movilizado (kg/día) asociado a los eventos con caudal superior a 30 m³/s. en el punto de salida de la cuenca 110.

En esta figura, se pueden comparar las simulaciones del caudal de sedimento transportado en condiciones de cambio climático, frente al registro histórico. Se aprecia una tendencia de los puntos, conforme el caudal de sedimento aumenta, al situarse por debajo de la recta indicando que, para ambos escenarios de cambio climático, los pulsos de sedimento (kg/s) tienen lugar de manera más intensa en las simulaciones a futuro.

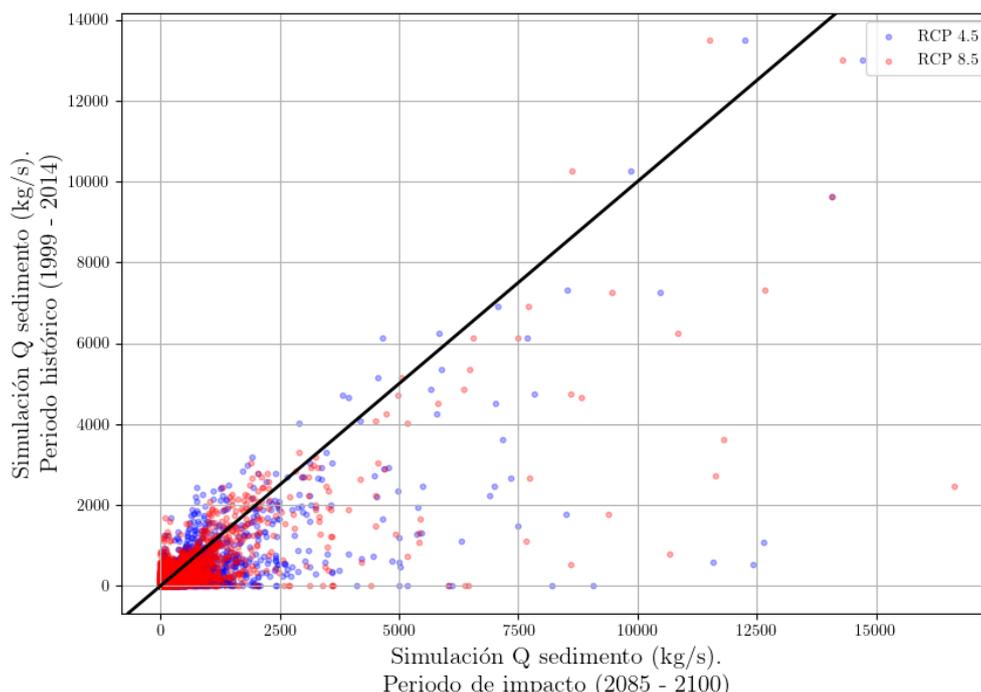


Figura 8_ Gráfico de dispersión. Caudal de sedimento (kg/s) simulado en condiciones de cambio climático para los escenarios RCP 4.5 (azul) y RCP 8.5 (rojo) frente al caudal de sedimento simulado en condiciones históricas.

4 PROPUESTA DE ACTUACIONES DE ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN

Partiendo de los resultados expuestos, y de la cartografía elaborada, se han detectado los puntos críticos, dentro de la zona de estudio, que pueden verse más afectados por los cambios producidos en el comportamiento erosivo-sedimentario de la cuenca, y donde se realiza la siguiente propuesta de actuaciones para atender a los diferentes riesgos asociados.

Las medidas de adaptación y mitigación planteadas seguirán las directrices del Plan de Impulso al Medio Ambiente para la Adaptación al Cambio Climático en España en materia de gestión del agua y del dominio público hidráulico PIMA Adapta-AGUA, que se enmarca dentro del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC). Además, se hará especial hincapié en seguir las líneas estratégicas MG1 del Plan Andaluz de Acción por el Clima (PAAC), entre las que destaca para la zona de estudio, la concepción de las zonas forestales como medio para

conseguir la fijación del carbono y revertir la tendencia de saturación en la absorción del CO₂.

Los efectos provocados por un aumento de la erosión en la zona de montaña de Sierra Nevada, favorecen el riesgo de desprendimientos, deslizamientos de laderas, pérdida de suelo fértil para las actividades agrícolas y zonas de bosque e incluso riesgo de incendio por el avance de la desertificación. En esta zona, se plantean medidas que mitiguen el comportamiento erosivo de las zonas en ladera, como la repoblación de zonas forestales, el desvío de la escorrentía en zonas con suelo descubierto, y en el caso de ser ineficientes, apostar por la regeneración del suelo. Para el control de los cambios previsibles en el comportamiento erosivo de la zona, se propone la implementación de una red de monitoreo del deshielo de la cobertura permanente de nieve.

Las medidas planteadas en el cauce del río irán enfocadas a propiciar una mayor retención o distribución de la carga fluvial transportada con el objetivo de disminuir la acumulación de sedimento en la parte baja de la cuenca, donde se prevé una afección importante en el avance de la colmatación del embalse de Rules. La construcción de pequeños diques que permitan el paso del agua y retengan el sedimento en los afluentes del Guadalfeo, favorecerá la atenuación de la pendiente media del curso fluvial. Además, se proponen medidas de mantenimiento y conservación del río que ayuden a disminuir el riesgo de inundación por obstrucción del cauce. Para evitar posibles daños provocados por grandes avenidas en los márgenes del río, se actuará sobre éstos mediante técnicas de estabilización y revegetación, intentando que todas estas medidas se encuentren, dentro de sus posibilidades, alineadas con la naturaleza.

Todas estas medidas de actuación, a escala de cuenca y cauce, ayudarán a la reducción de la sedimentación del embalse de Rules, alargando su vida útil al no verse reducida su capacidad de regulación de manera tan acelerada.

Además, disminuir la entrada de sedimento contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero producidas en el embalse asociadas a los procesos biológicos de descomposición de la materia orgánica adherida al sedimento. En este sentido, las actuaciones de control y reducción de procesos erosivos y flujo de sedimento han de entenderse como medidas de mitigación. Por último, promover la reducción del uso de fertilizantes en los usos agrícolas, también contribuye a reducir dichas emisiones.

5 REFERENCIAS.

Aguilar, C., Herrero, J., Millares, A., Losada, M. A., Polo, M. J. (2014). Meteomap: Generation of meteorological variables for distributed physically-based hydrological modeling. CUNY Academic Works.

Barra, A., Monserrat, O., Solari, L., Herrera, G., Lopez, C., Onori, R., Reichenbach, P., González-Alonso, E., Mateos, R.M., Bianchini, S., et al. (2018). The safety project: Sentinel-1 for the management of geological risk. In Proceedings of the WIT Transactions on Engineering Sciences

Bergillos, R. J., Rodríguez-Delgado, C., Millares, A., Ortega-Sánchez, M., and Losada, M. A. (2016). Impact of river regulation on a Mediterranean delta: assessment of managed versus unmanaged scenarios. *Water Resources Research*, 52(7):5132-5148.

Buishand, T.A. (1977). Stochastic modelling of daily rainfall sequences. *Mededlingen Land-bouwhogeschool Wageningen*, 45-49

Egüen, M., Aguilar, C., Polo, M. J., Moreno, I., Herrero, J., Millares, A., & Losada, M. A. (2009). WiMMed, a distributed physically-based watershed model (II): Application examples. *Environmental Hydraulics: Theoretical, Experimental & Computational Solutions*, 229-232.

Elliot, W.J., Liebenow, A.M., Laflen, J.M., Kohl K.D. (1989). A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987; 88.' NSERL Report No. 3. (The Ohio State University/USDA-Agricultural Research Service: West Lafayette, IN)

Foster, G.R., Flanagan, D.C., Nearing, M.A., Lane, L.J., Risse, L.M., Finkner, S.C. (1995). Hillslope erosion component, chap 11. D.C. Flanagan, M.A. Nearing (Eds.), *USDA-Water Erosion Prediction Project, Hillslope profile and watershed Model Documentation*, NSERL Report no. 10, West Lafayette, Indiana (1995), pp. 11-1-11-12

Herrero, J., Aguilar, C., Millares, A., Egüen, M., Carpintero, M., Polo, M., Losada, M. A. (2010). *WiMMed. User Manual v1.1*. University of Granada, Granada.

Herrero, J., Millares, A., Aguilar, C., Egüen, M., Losada, M.A., Polo, M.J., 2014. Coupling spatial and time scales in the hydrological modelling of Mediterranean regions: WiMMed. CUNY Academic Works. http://academicworks.cuny.edu/cc_conf_hic/315.

Herrero, J., Polo, M. J., Moñino, A., & M. Losada. (2009). An energy balance snowmelt model in a Mediterranean site. *Journal of Hydrology* 371(1), 98–107.

IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA..

Millares, A., Herrero, H., Bermúdez, M., Leiva, J.F., Cantalejo, M. (2020). Long-term modeling of soil loss and fluvial transport processes in a mountainous semi-arid basin, southern Spain. River Flow 2020 - Twentieth International Conference on Fluvial Hydraulic, Delf, Netherlands (under review)

Millares, A., Díez-Minguito, M., Moñino, A. (2019). Evaluating gully effects on modeling erosive responses at basin scale. Environmental Modelling & Software, 111, 61-71.

Millares, A., Moñino, A. 2018. Sediment yield and transport process assessment from reservoir monitoring in a semi-arid mountainous river. Hydrological Processes 32(19), 2990–3005.

Millares, A., Moñino, A., Arjona, S., Baquerizo, A. (2018). Suspended sediment dynamics by event typology and its siltation effects in a semi-arid snowmelt-driven basin. In E3S Web of Conferences (Vol. 40, p. 04008). EDP Sciences

Millares, A., Gulliver, Z., and Polo, M. (2012). Scale effects on the estimation of erosion thresholds through a distributed and physically-based hydrological model. Geomorphology, 153-154:115-126.

Millares, A., Polo, M., Moñino, A., Herrero, J., and Losada, M. (2014 a). Bedload dynamics and associated snowmelt influence in mountainous and semiarid alluvial rivers. Geomorphology, 206(0):330-342.

Millares, A., M. Polo, A. Monino, J. Herrero, and M. Losada (2014b), Reservoir sedimentation and erosion processes in a snow-influenced ~ basin, in Southern Spain, in Reservoir Sedimentation—Special Session on Reservoir Sedimentation of the 7th International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow, pp. 91–98, Taylor and Francis Group, London, U. K.

MITECO (2020). Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2021-2030. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). Madrid 246 p.

Morgan, R.P.C., (1995). Soil Erosion and Conservation. Longman, London, 298 pp.
Rodríguez, J. (2008). Sistema de Inferencia Espacial de Propiedades Físico-Químicas e Hidráulicas de los Suelos de Andalucía. Herramienta de Apoyo a la Simulación de Procesos Agro-Hidrológicos a Escala Regional. Informe Final. Empresa Pública de Desarrollo Agrario y Pesquero, Consejería de Agricultura y Pesca.

ANEJO 1: Resumen de los resultados de las simulaciones.

En este apartado se presentan las tablas donde se resumen los resultados y variaciones observadas de las simulaciones efectuadas con el modelo hidrológico distribuido WiMMed en condiciones de cambio climático y en condiciones actuales.

Tabla 5_ Resultados medio anuales de las simulaciones efectuadas para las variables de estudio en el periodo del registro histórico y los escenarios de cambio climático.

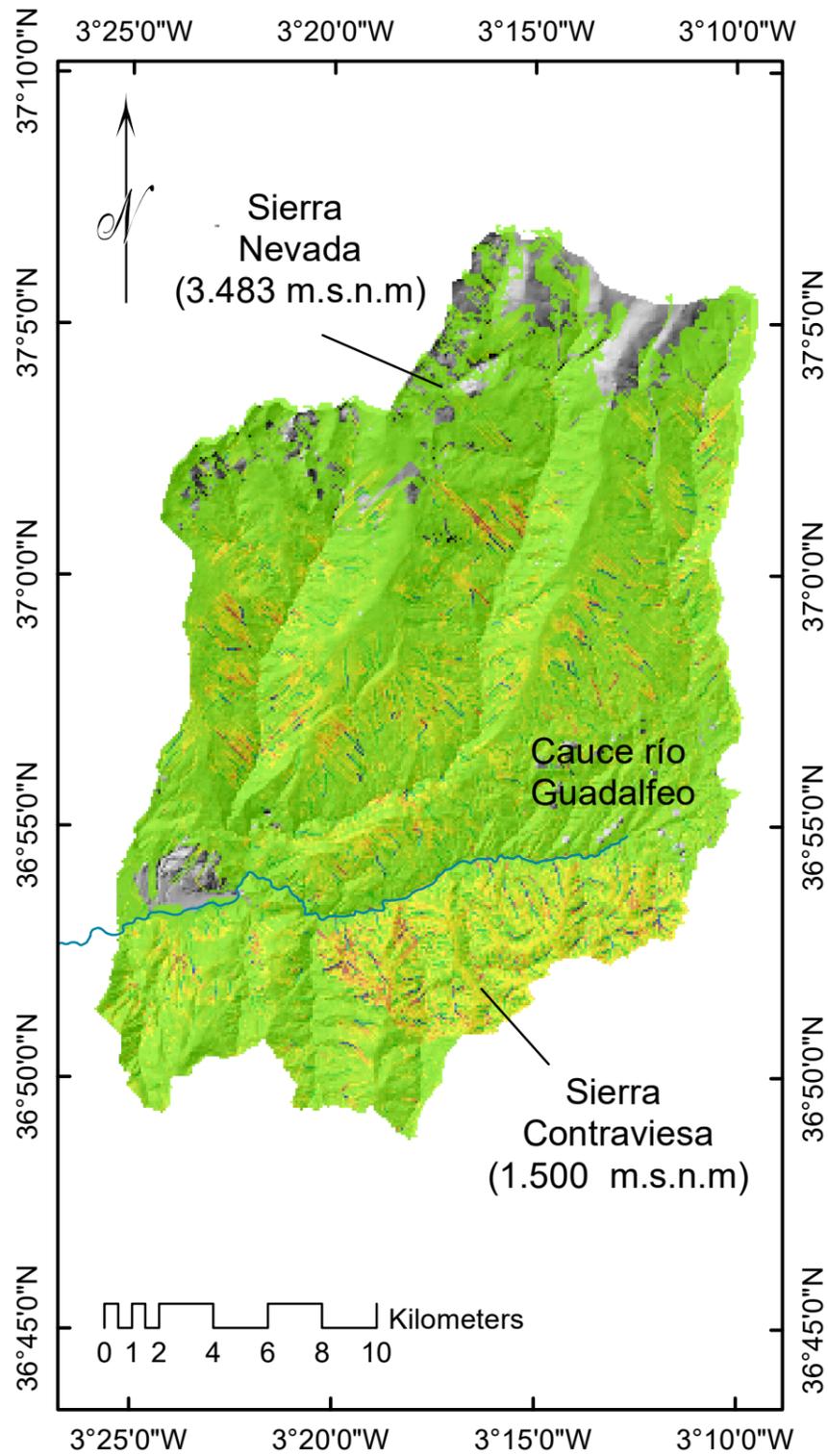
Media anual en toda la cuenca	Registro histórico (1999 – 2014)	RCP 4.5 (2085 – 2100)	RCP 8.5 (2085 – 2100)
Precipitación (hm ³ /anuales)	400	406	275
Precipitación Nieve (hm ³ /anuales)	121.052	111.073	32.022
Fusión Nieve (hm ³ /anuales)	101.209	100.535	29.833
Aportación salida cuenca (hm ³ /anuales)	126	144	64
Erosión total (Tn/año)	272700717.43	509992149.05	355407095.21
Intensidad media eventos de precipitación (mm/día)	14,47	16,57	15.42

Tabla 6_ Variación en % de los resultados obtenidos en las simulaciones de los escenarios con cambio climático (RCP 4.5 y RCP 8.5) respecto del periodo histórico (1999 – 2014).

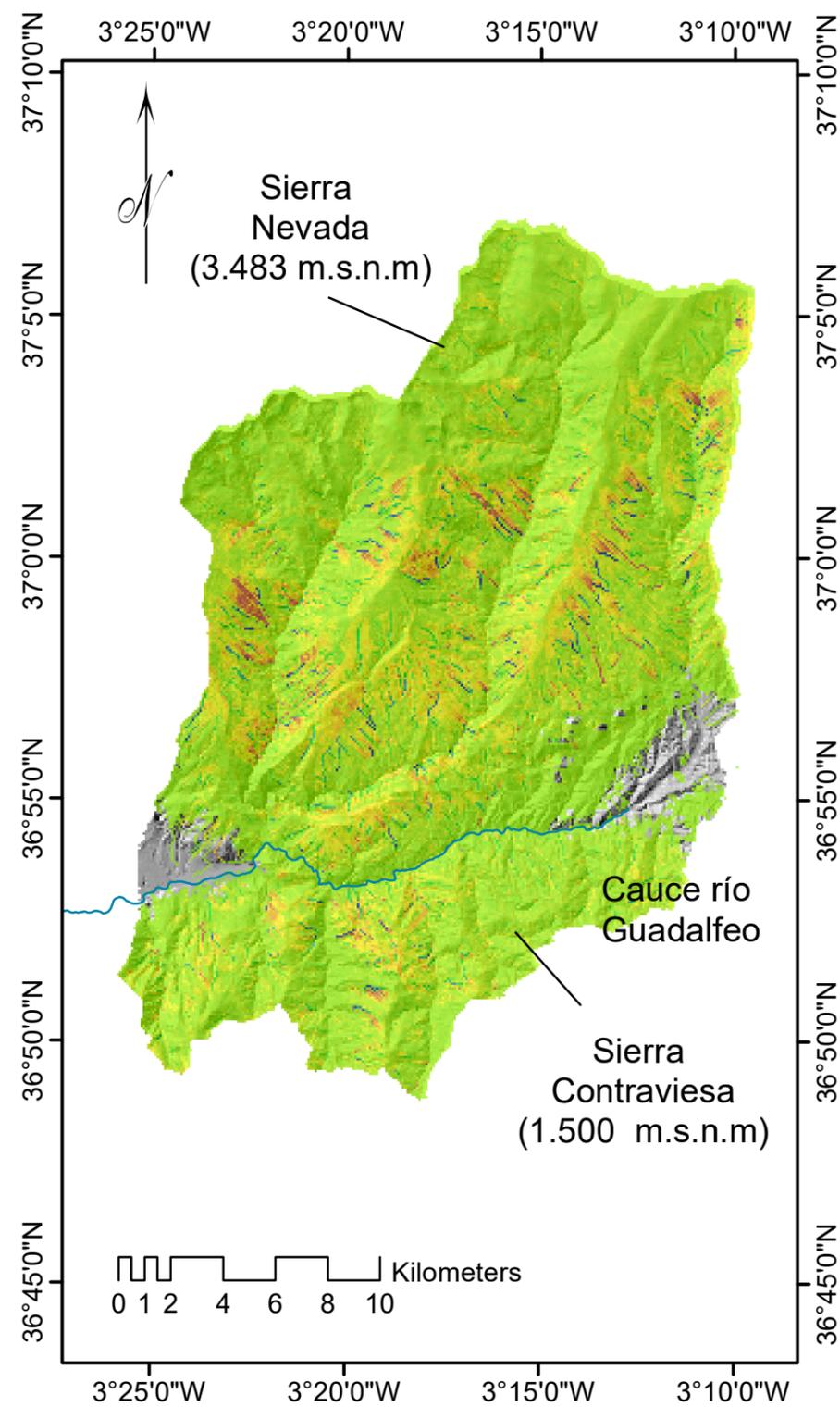
Variación en % respecto del periodo histórico (1999 – 2014)	RCP 4.5 (2085 – 2100)	RCP 8.5 (2085 – 2100)
Precipitación	+ 2.57 %	- 30 %
Precipitación Nieve	- 8.24 %	-73 %
Fusión Nieve	- 1.25 %	-70 %
Aportación salida cuenca	+ 14.28 %	-49.20 %
Erosión total	+ 87 %	+30 %
Intensidad media eventos de precipitación	+ 14.51 %	+ 6.56 %

ANEJO 2: Cartografía en formato A3 de zonas vulnerables de erosión en laderas.

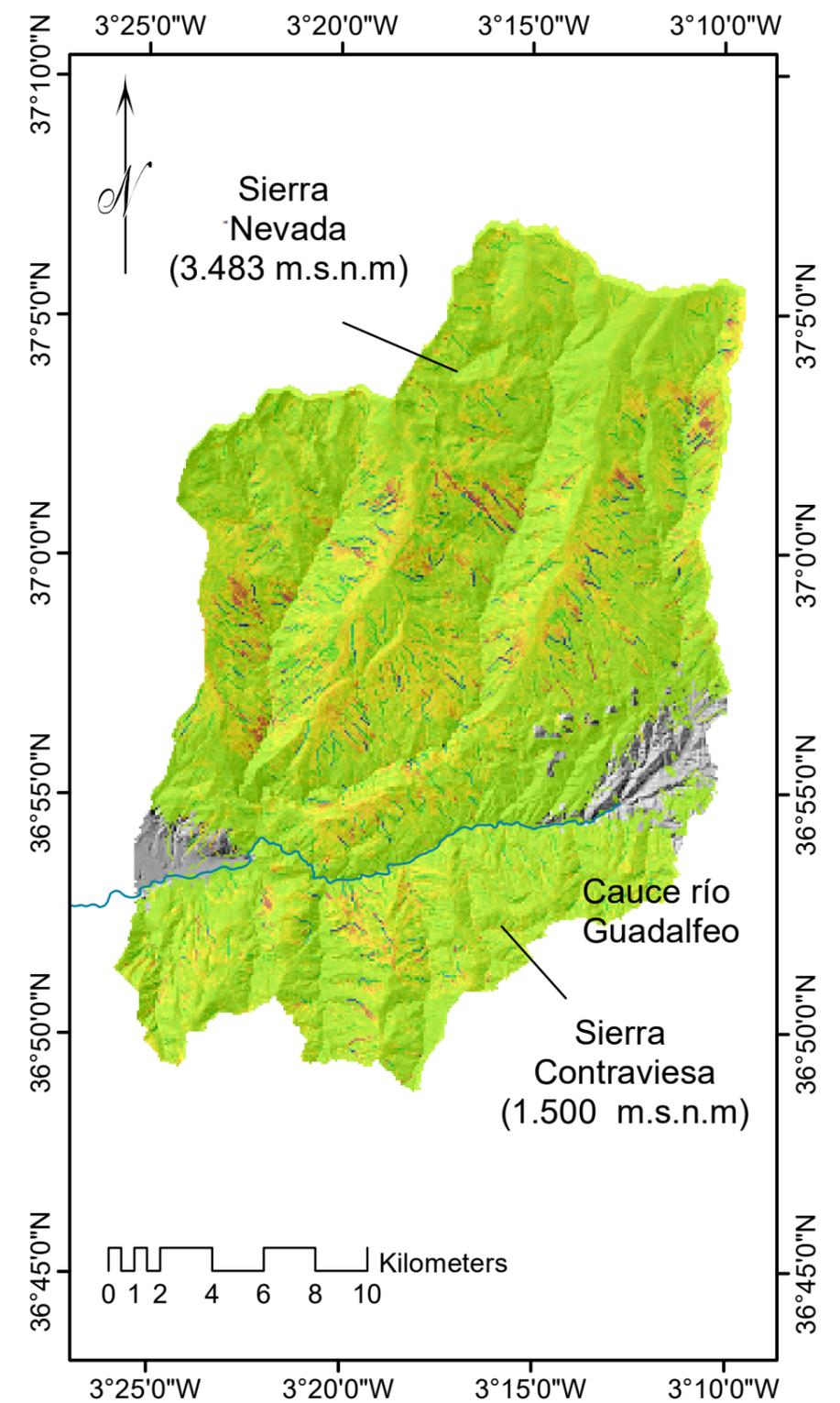
Registro Histórico
(1999 - 2014)



RCP 4.5
(2085 - 2100)



RCP 8.5
(2085 - 2100)



1.41e+006



ACTIVIDAD E.3.1.3: Cartografía de zonas vulnerables de erosión en laderas.

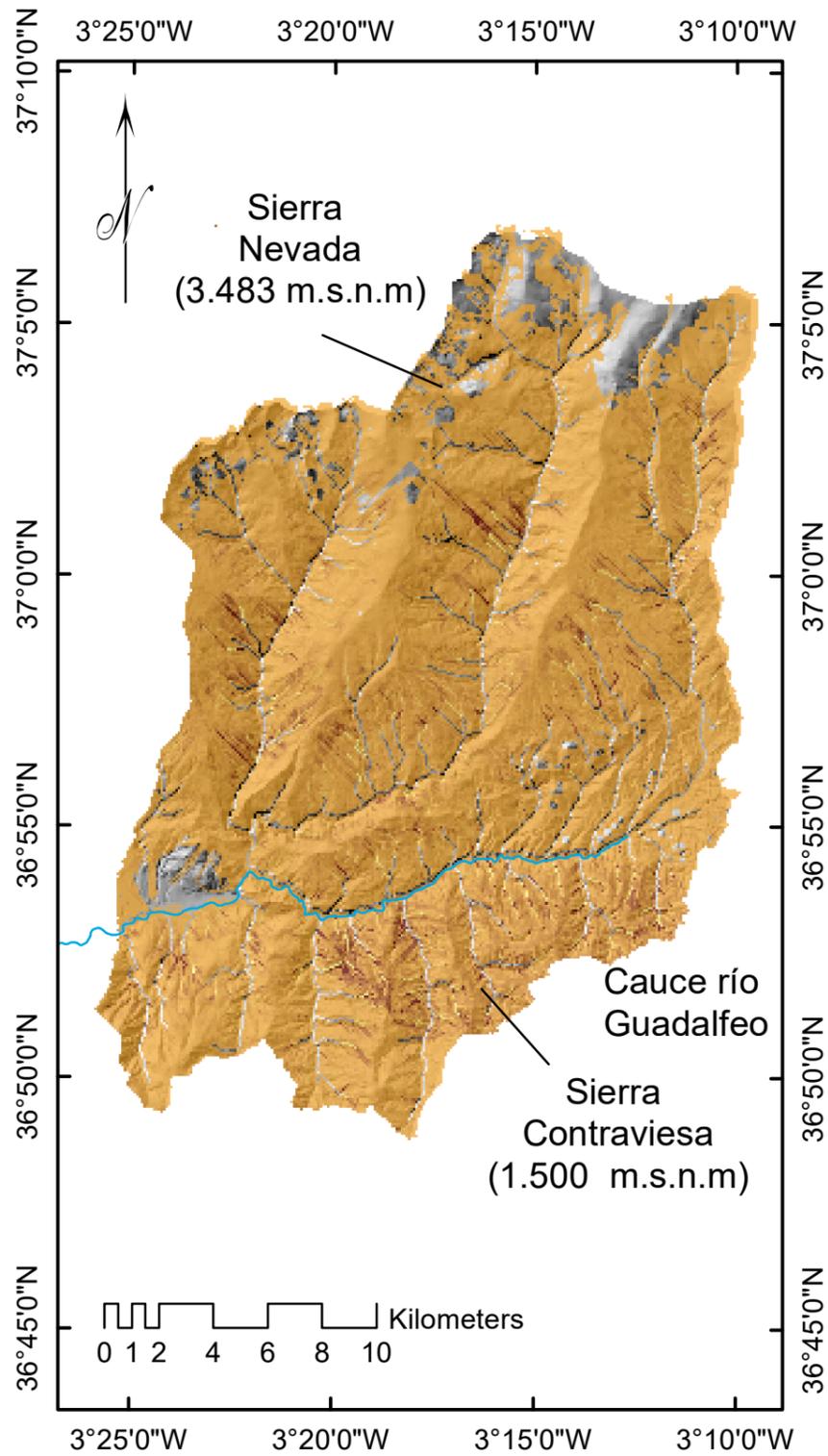
TÍTULO: Erosión Total (kg/m²) en el periodo de simulación.
Estudio en la cuenca de cabecera del río Guadalfeo

Nº 1

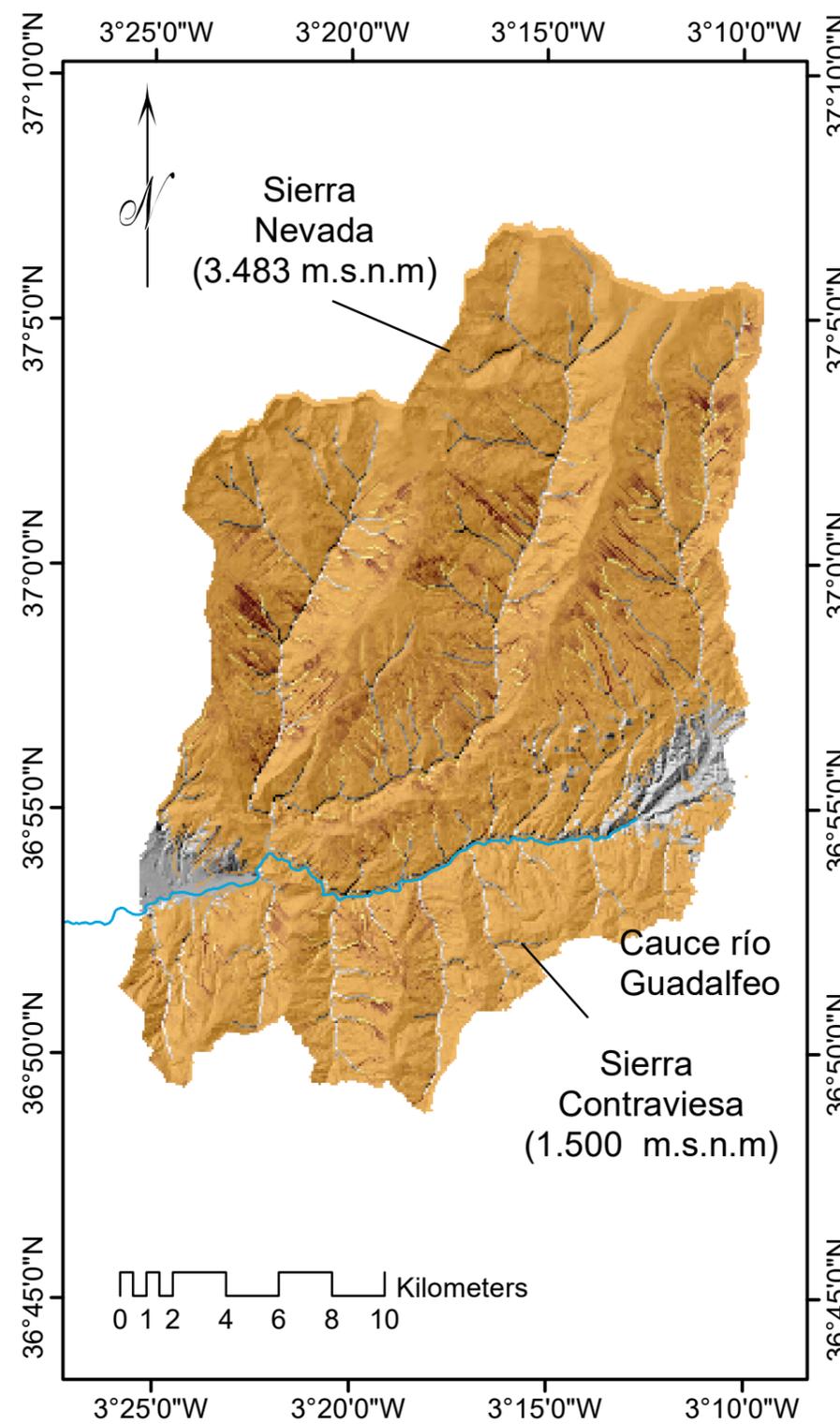
-3.63e+006

kg / m²

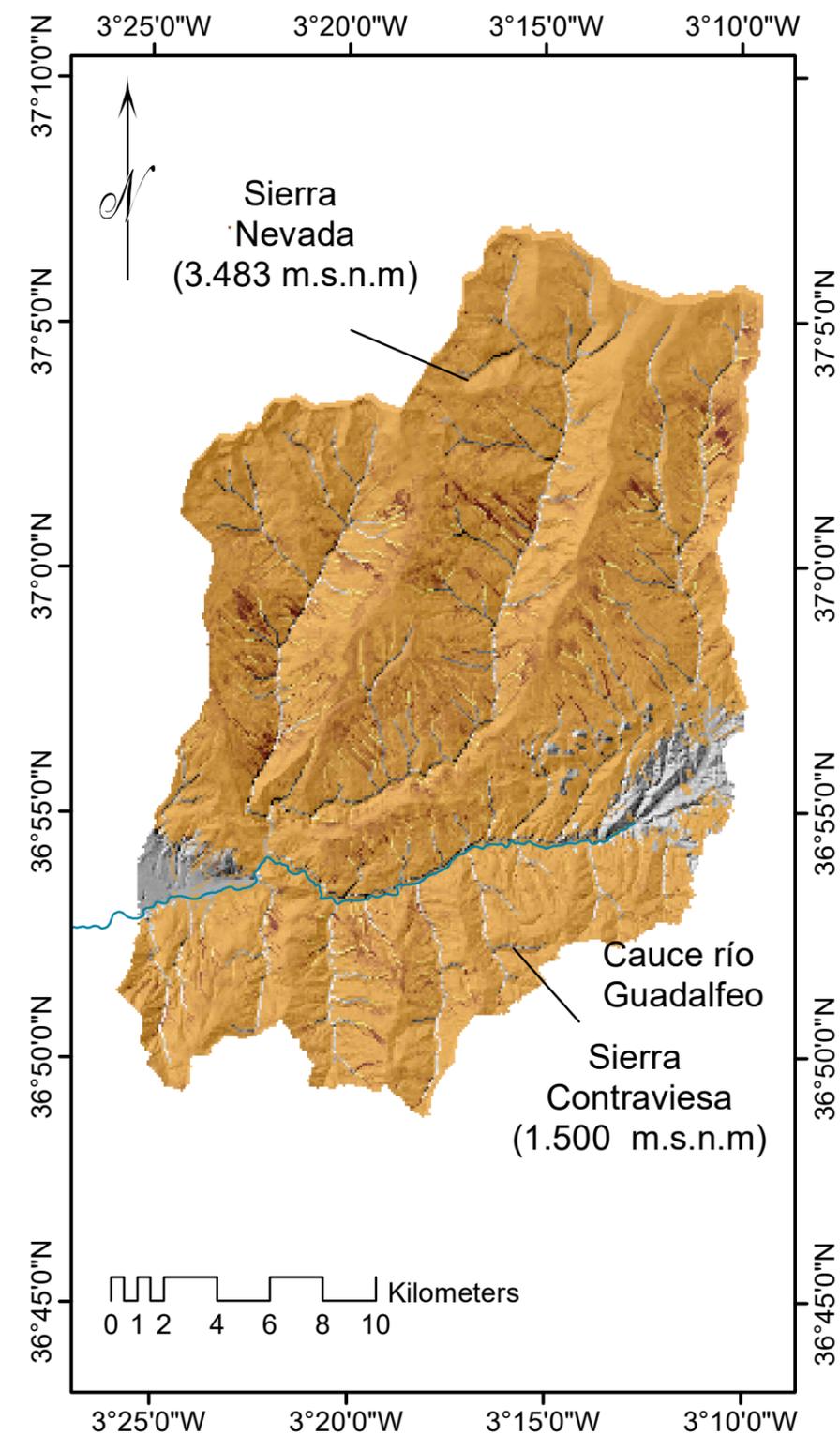
Registro Histórico
(1999 - 2014)



RCP 4.5
(2085 - 2100)



RCP 8.5
(2085 - 2100)



1.41e+006



ACTIVIDAD E.3.1.3: Cartografía de zonas vulnerables de erosión en laderas.

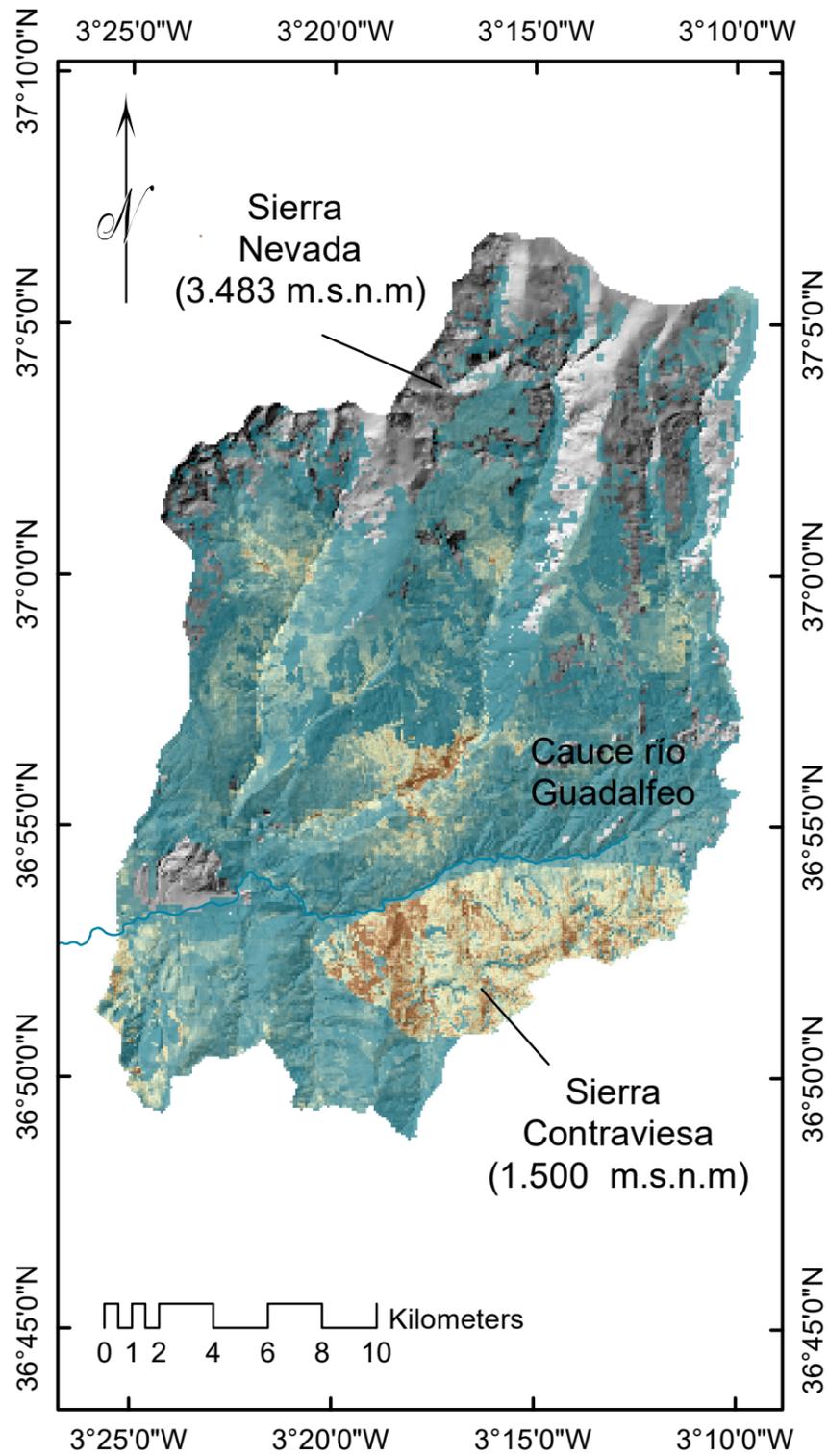
TÍTULO: Erosión Rill (kg/m²) en el periodo de simulación.
Estudio en la cuenca de cabecera del río Guadalfeo

Nº 2

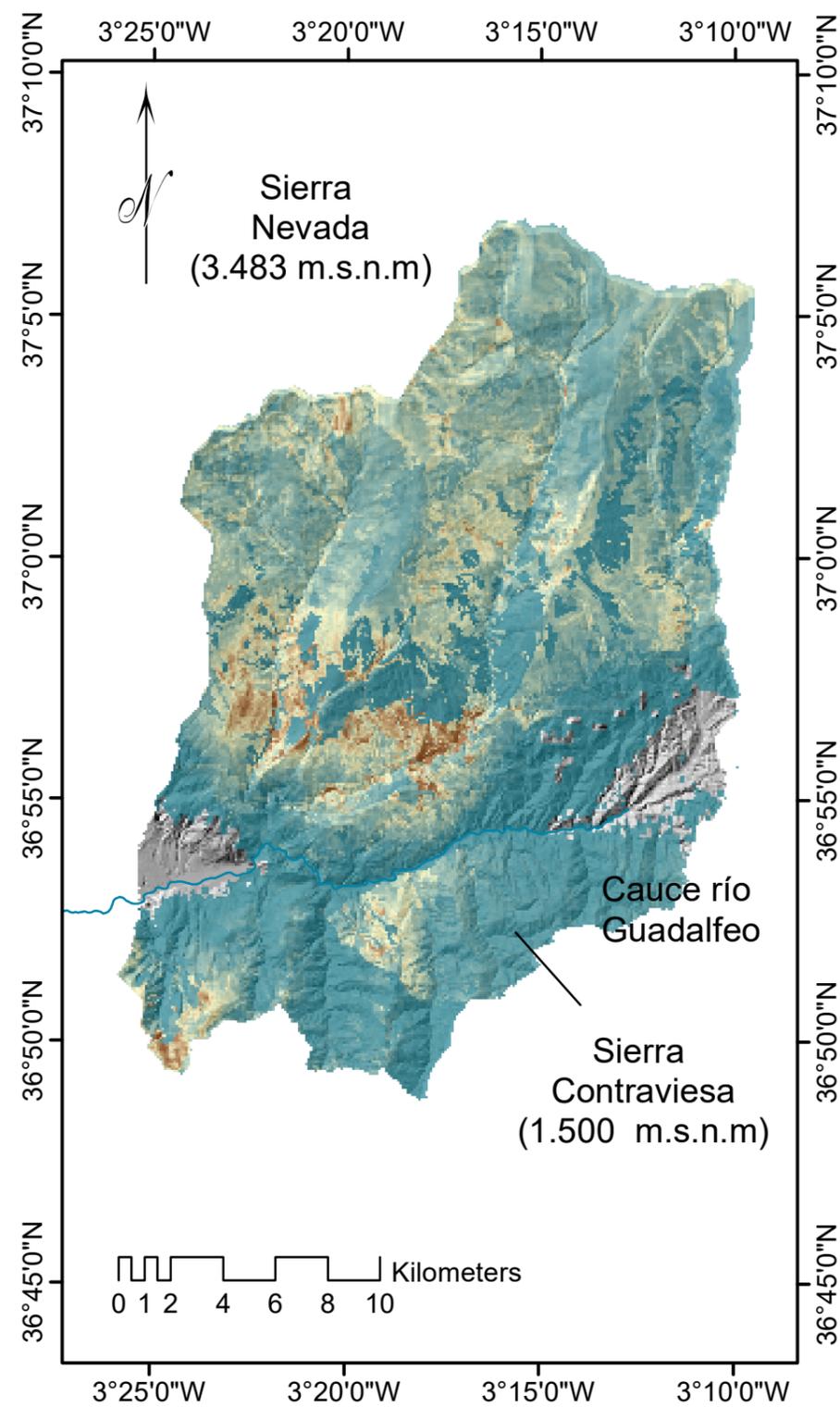
-3.63e+006

kg / m²

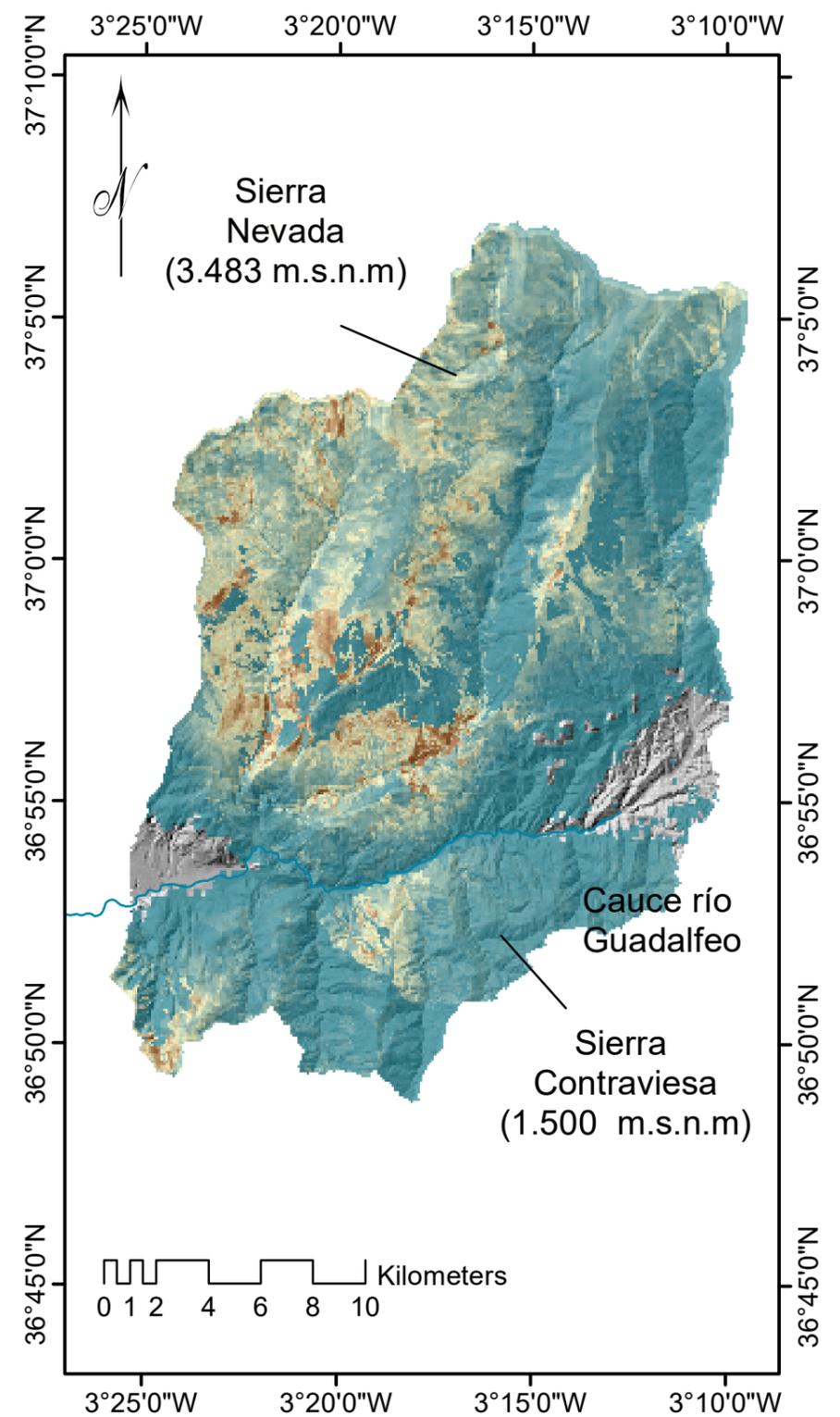
Registro Histórico
(1999 - 2014)



RCP 4.5
(2085 - 2100)



RCP 8.5
(2085 - 2100)

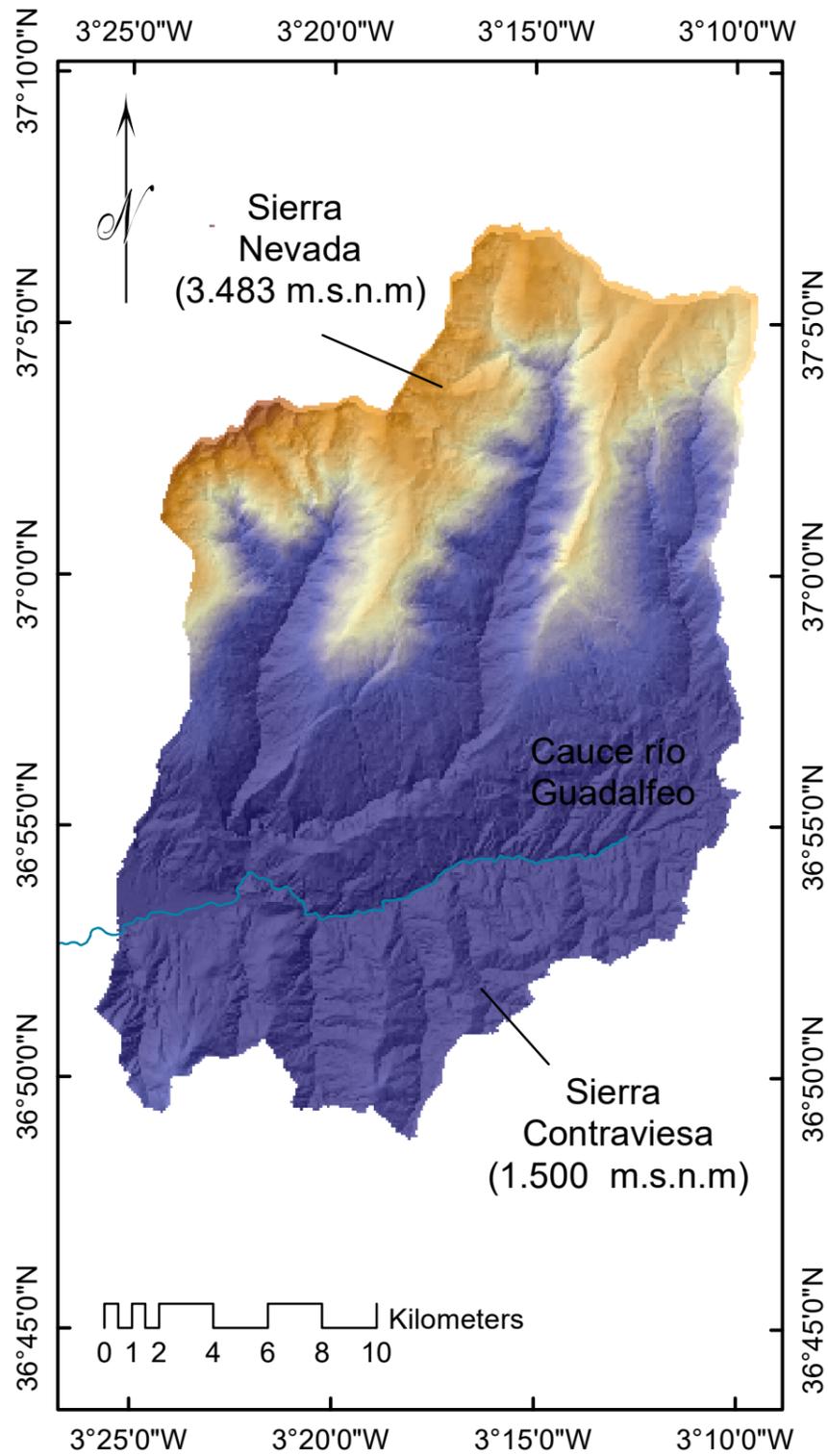


ACTIVIDAD E.3.1.3: Cartografía de zonas vulnerables de erosión en laderas.

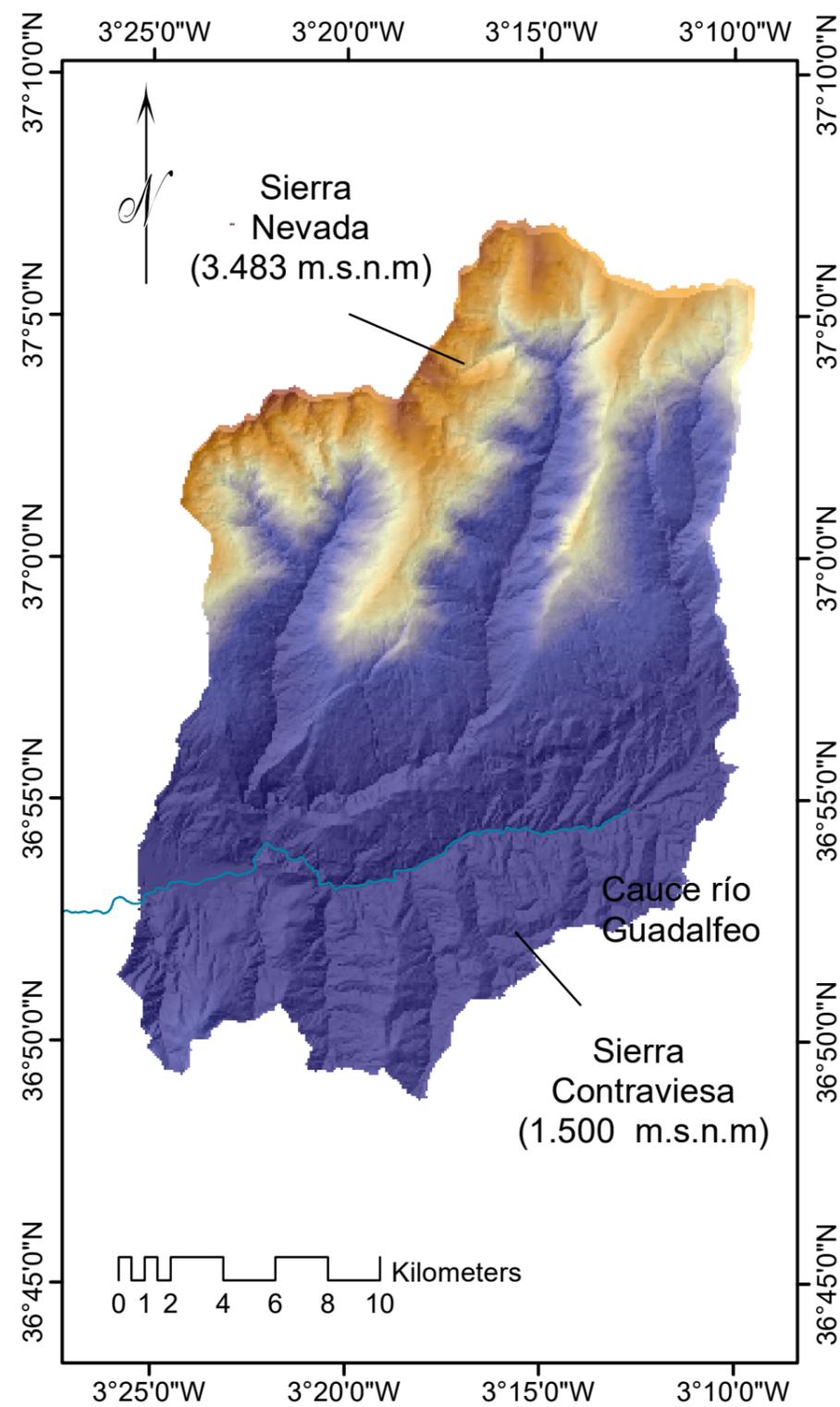
TÍTULO: Erosión Interill (kg/m²) en el periodo de simulación.
Estudio en la cuenca de cabecera del río Guadalfeo

Nº 3

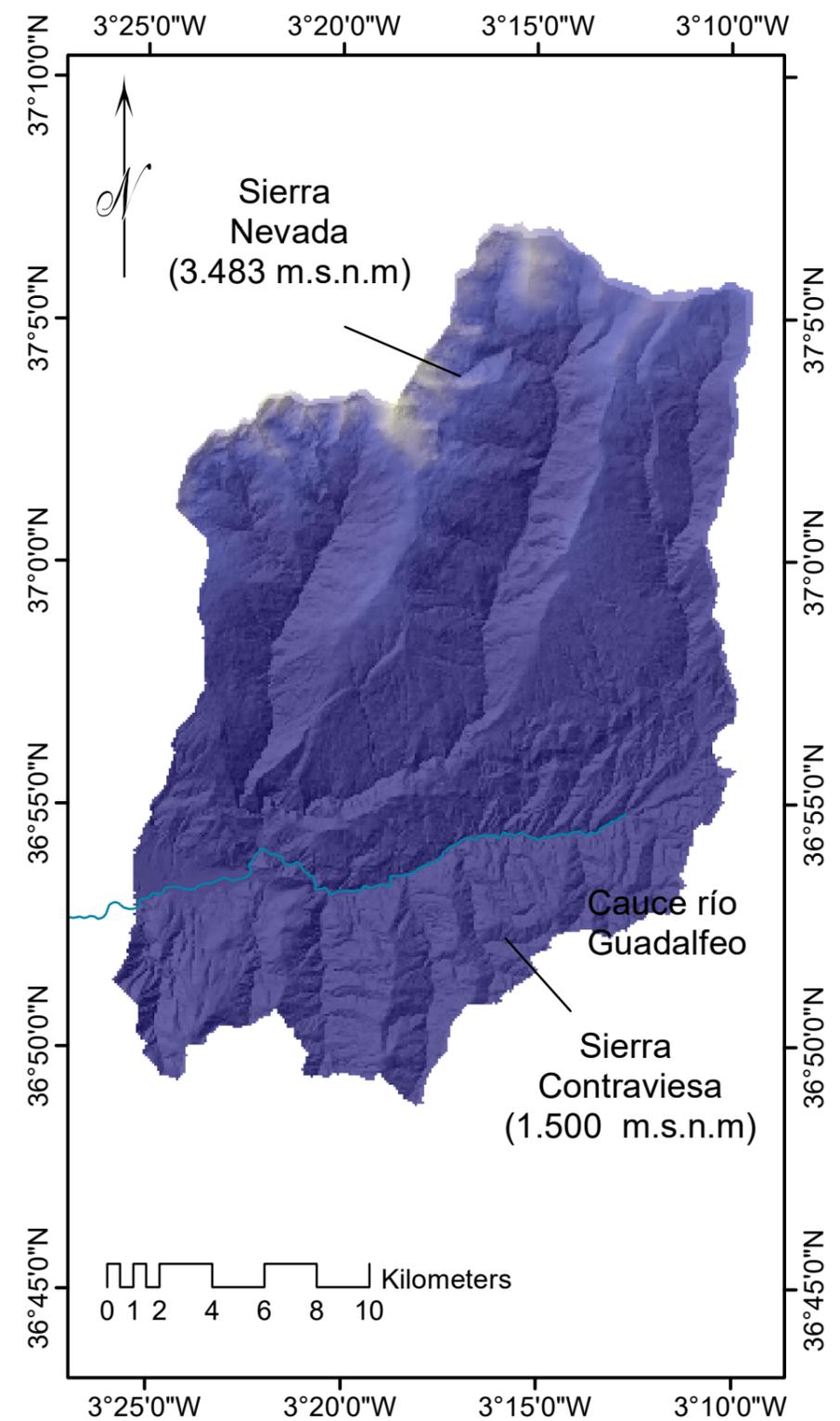
Registro Histórico
(1999 - 2014)



RCP 4.5
(2085 - 2100)



RCP 8.5
(2085 - 2100)



12000



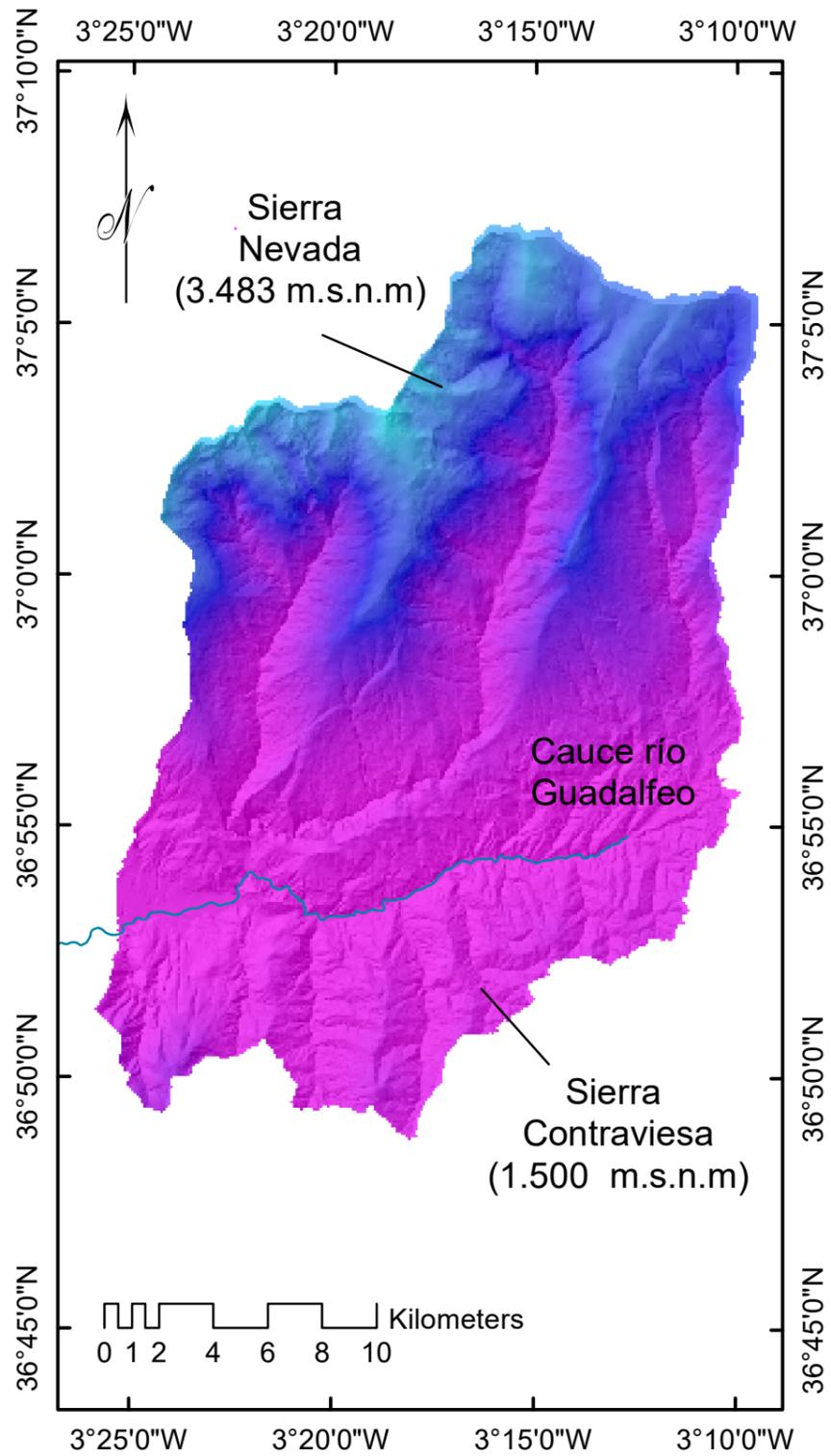
0
mm

ACTIVIDAD E.3.1.3: Cartografía de zonas vulnerables de erosión en laderas.

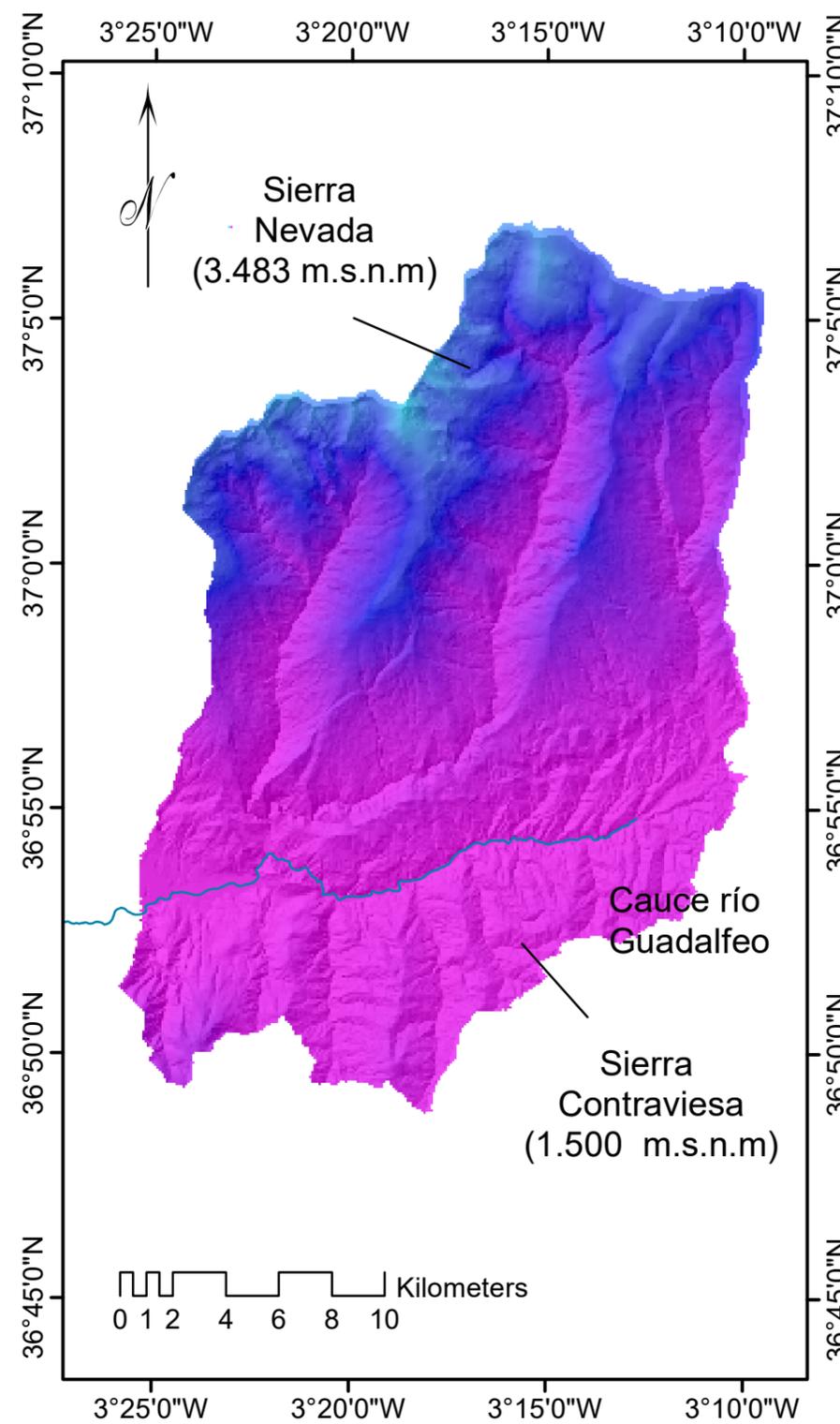
TÍTULO: Fusión de nieve (mm) en el periodo de simulación.
Estudio en la cuenca de cabecera del río Guadalfeo

Nº 4

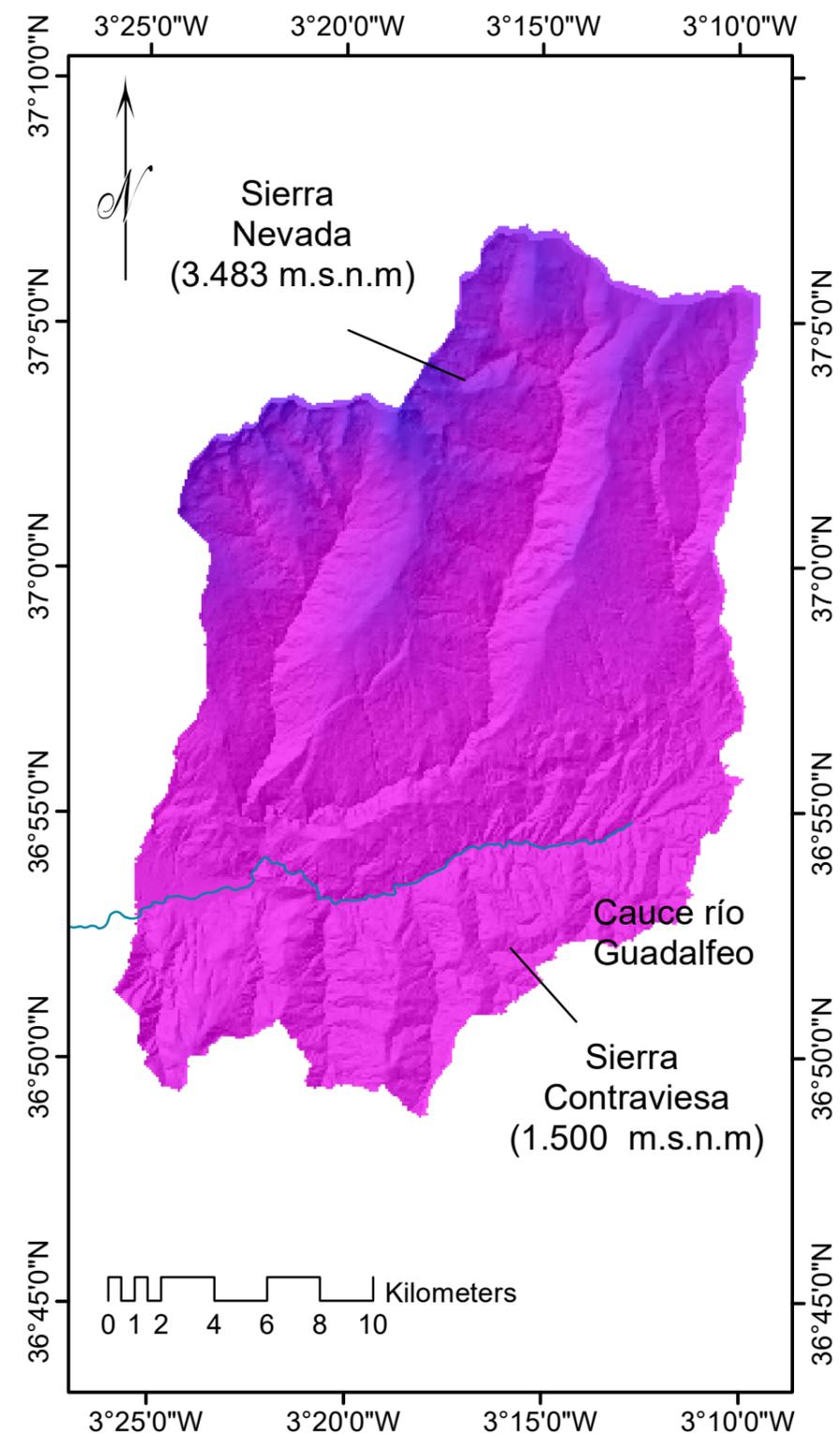
Registro Histórico
(1999 - 2014)



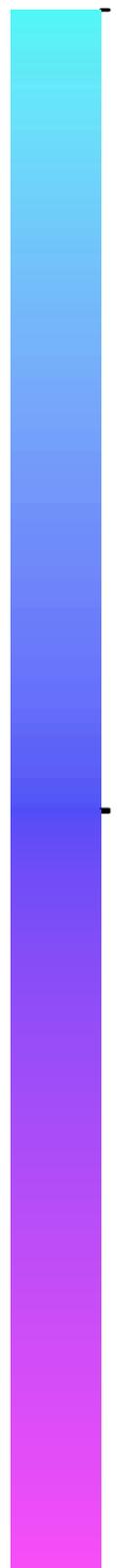
RCP 4.5
(2085 - 2100)



RCP 8.5
(2085 - 2100)



14500



0

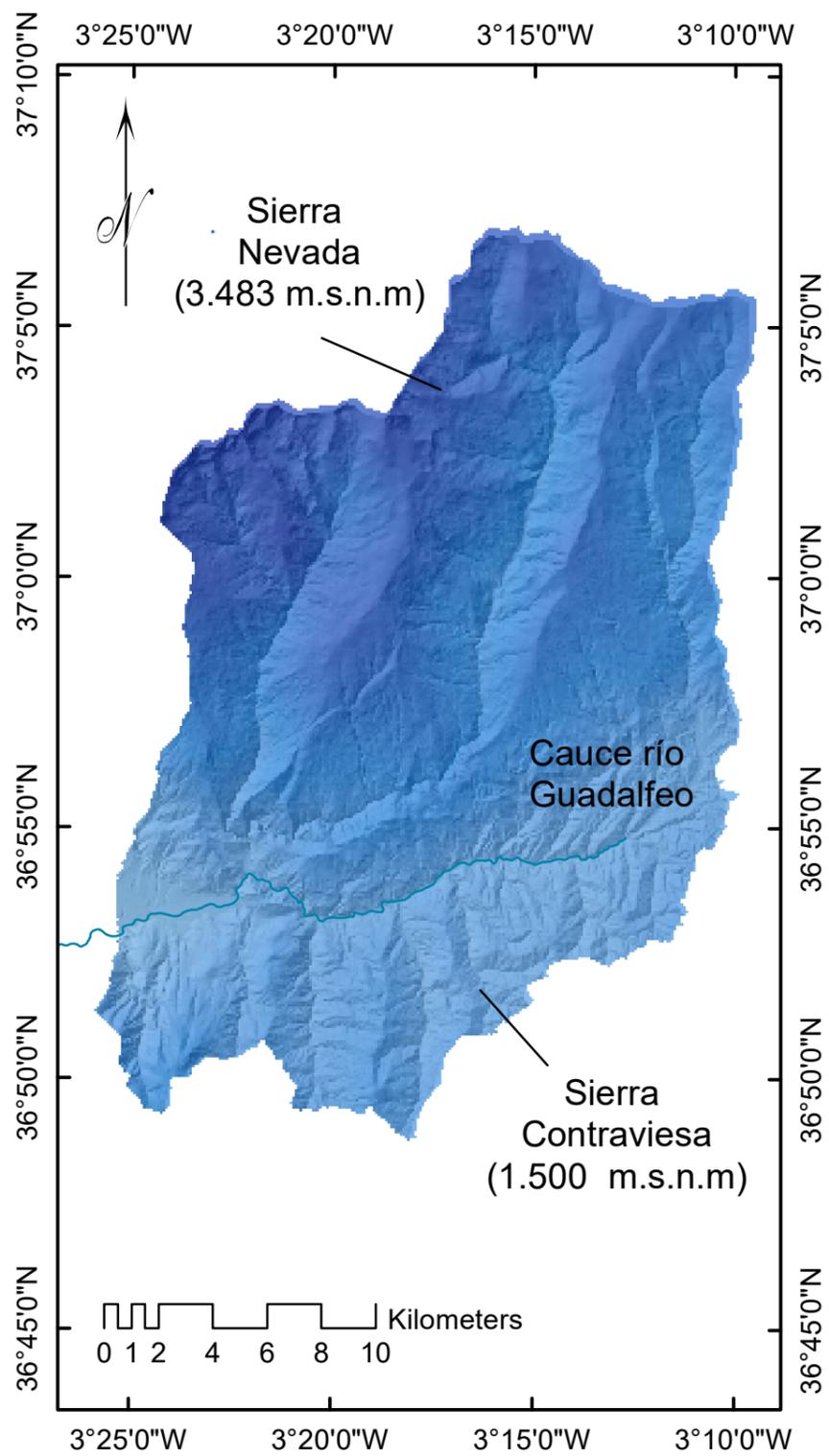
mm

ACTIVIDAD E.3.1.3: Cartografía de zonas vulnerables de erosión en laderas.

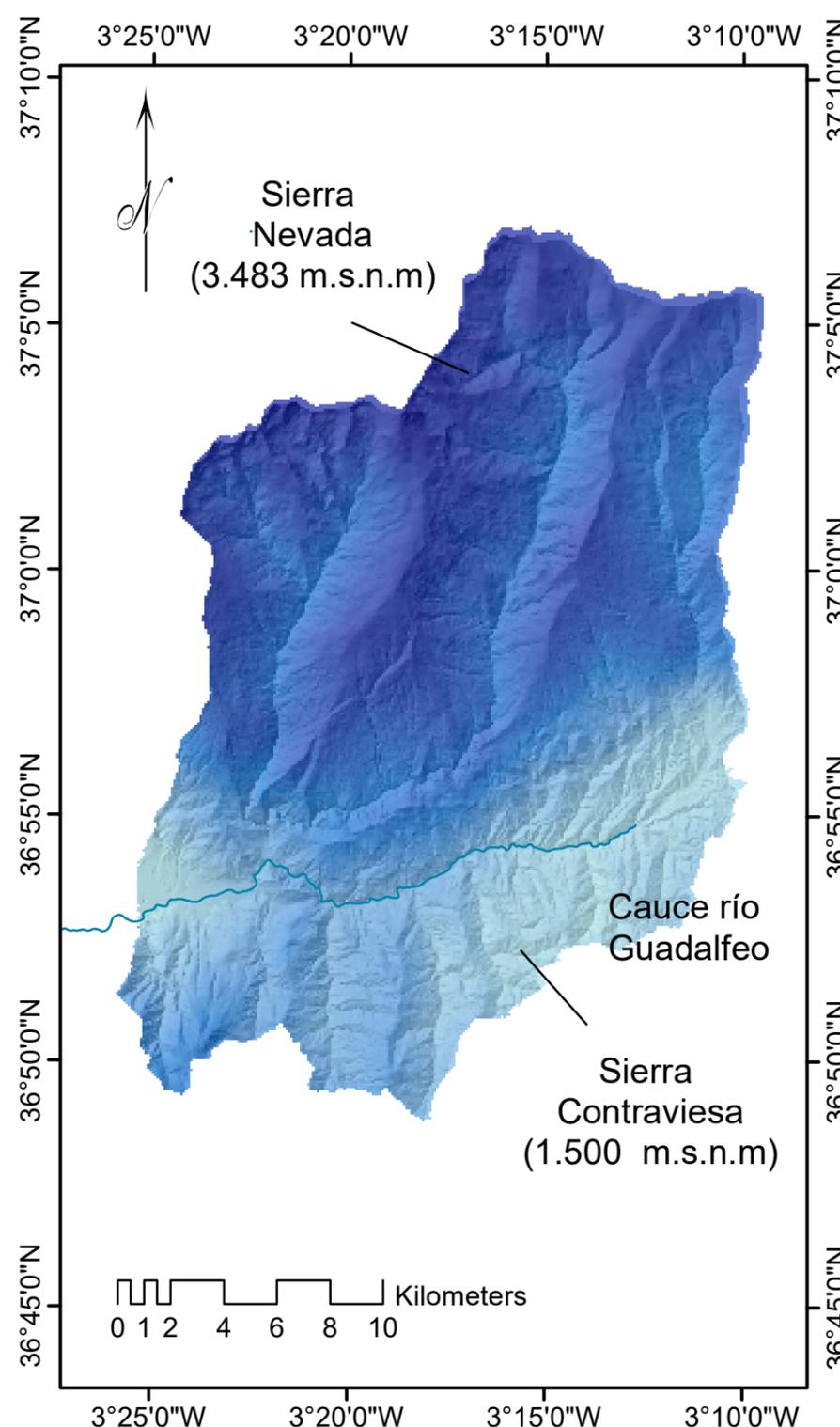
TÍTULO: Precipitación en forma de nieve (mm) en el periodo de simulación.
Estudio en la cuenca de cabecera del río Guadalfeo

Nº 5

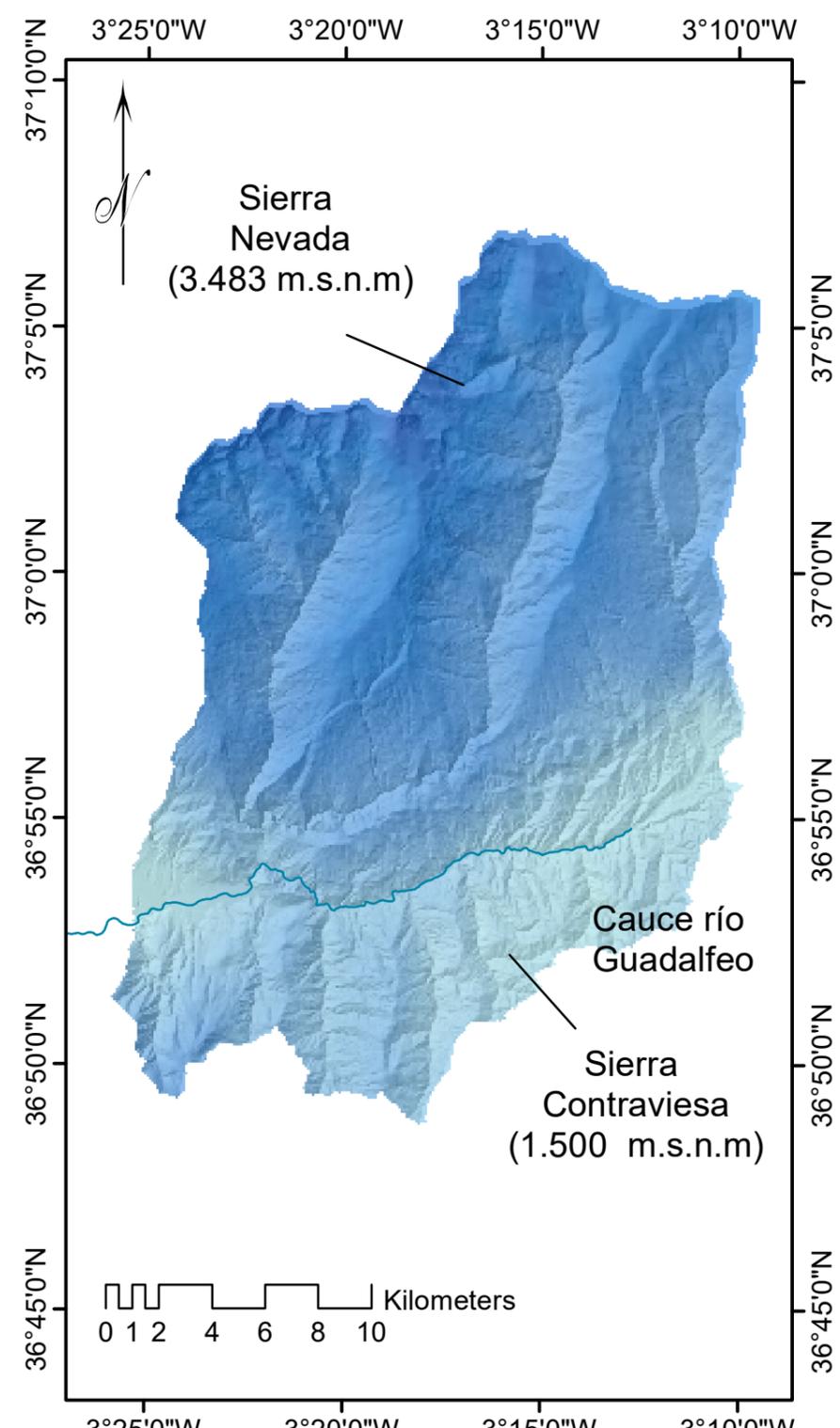
Registro Histórico
(1999 - 2014)



RCP 4.5
(2085 - 2100)



RCP 8.5
(2085 - 2100)



20.000

2.100

mm

ACTIVIDAD E.3.1.3: Cartografía de zonas vulnerables de erosión en laderas.

TÍTULO: Precipitación (mm) en el periodo de simulación.

Estudio en la cuenca de cabecera del río Guadalfeo

Nº 6