

EXPOSICIÓN DEL TERRITORIO HISTÓRICO DE GIPUZKOA FRENTE A DESLIZAMIENTOS EN MASA Y FLUJOS BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO



ENERO 2022

EXECUTIVE OVERVIEW (ABSTRACT)

Climate change is nowadays a close reality, being the most likely cause of the accumulation of greenhouse gases in the atmosphere. Consequently, the data between 1880 and 2012 of the temperature of the land and ocean surface, combined and averaged globally, show a linear increase of 0,85°C over this period.

Among the different impacts that might be generated by climate change are landslides, and this is where the present study is placed. It includes the results of the work carried out for the analysis and characterization of the risks associated with landslides or slope instabilities, which the Historical Territory of Gipuzkoa (HTG) will face under the scenarios of climate change.

For the analysis and study of the impact of climate change, this work is based on the conclusions provided by IHOBE within the KLIMATEK project. Analysing the climate scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5 in different time intervals; modeling the 1970 to 2015 historical period and forecasts for the 2011-2040, 2040-2070, and 2070-2100 time periods.

What concerns the specific development of the project's tasks, the first one was to compile information, both on the landslide inventories of the different administrations and on the existing methods of the risk analysis.

From this initial phase, the main conclusion is that the methodology of the study to be carried out can't be based only on a statistical analysis of the catalogued landslides, due to an insufficient number of data and the low representativeness of them (a large number are located on the margins of the main infrastructures, and in most of these cases is the anthropic factor that has generated these landslides). It is decided to apply a mixed methodology, between an analytical hierarchical analysis (to determine the weight of the conditional factors of the instabilities) and statistical methods (to define the percentages of each class, within each factor)

By the application of this methodology, a first map of the susceptibility of the Historical Territory of Gipuzkoa it is obtained.

Once the susceptibility has been defined, the danger is determined, adding the effect of the triggering factors, in this case, the rainfall projections made by IHOBE.

Once the hazard map had been produced, the next and last objective of the project was to generate a risk map, based on the previous creation of the vulnerability map. Even though a large quantity of information has been collected in digital format on exposed elements, such as types of land use (residential, facilities or industrial), location of infrastructures and situation of building in general (including from farmhouses to stables...), the determination of the vulnerability and the exposure goes beyond the proximity to a significant hazard zone, such proximity does not strictly mean that the risk is high, although it is a first point in the evaluation to be done.

The elaboration of a vulnerability and exposure map in a HTG in such a complex and largescale task that it deserves a project *per se*, with the collaboration of a multitask team. To give an outline of the work to be carried out, it would be necessary to define for each element (from residential buildings to infrastructures) a series of aspects such as the number of lives lost in case of landslide impact, structural damage, economic losses in both buildings and infrastructures; as well as those generated by lack of activity, assessment of possible pollution due to landslides in industrial areas, etc.

In order for the project to achieve the maximum objectives set, and taking into account that it is not possible with the available data to obtain a risk map for the entire HTG, a hazard assessment has been carried out on the exposed elements. Attempting to give a qualitative approximation of risk, depending on the proximity of these elements to areas of moderate to very high hazard. This analysis has been carried out for scenario 8.5 in the 2011-2040 projection and has been named qualitative analysis of the risk of exposed elements. This valuation has been compiled in the form of sheets for each functional area of the HTG, describing municipalities, rural areas, and main communication infrastructures.

Finally, the composition includes a series of conclusions on the evolution of the HTG landslide danger for scenarios 4.5 and 8.5, in the three climate projections (2010-2040, 2040-2070, and 2070-2100). These conclusions could be summarised as follows: while the main areas affected by moderate to very hazard are the same for both 4.5 and 8.5 scenarios, the evolution in the three-time projections is significantly different. In scenario 4.5 the hazard in the different projections increases gradually, however, in scenario 8.5 there is a sharp increase in the 2010-2040 projection, which is maintained in a very similar way in the following time projections (2040-2070 and 2070-2100).

A section has also been included at the end of the document, which includes comments and recommendations on possible future improvements to the results of both susceptibility and hazard, as well as defining lines of work and methodologies for the development of a vulnerability map of the HTG.

RESUMEN EJECUTIVO

El cambio climático es a día de hoy una realidad cercana, siendo la causa más probable la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Como consecuencia de esto, los datos entre 1880-2012 de temperatura de la superficie terrestre y oceánica, combinados y promediados globalmente, muestran un aumento lineal de 0,85° C en este periodo.

Entre los distintos impactos que puede generar el cambio climático, se encuentran los deslizamientos, y es donde se enmarca el presente estudio, en él se recogen los resultados del trabajo realizado para el análisis y caracterización de los riesgos asociados a los deslizamientos o inestabilidades de laderas, a los que se enfrentará el Territorio Histórico de Gipuzkoa (THG) bajo los escenarios de cambio climático.

Para el estudio y análisis del impacto del cambio climático, este trabajo parte de las conclusiones aportadas por IHOBE dentro del proyecto KLIMATEK. Analizándose los escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5 en diferentes intervalos temporales; modelizando el periodo histórico 1970 a 2015 y previsiones para los tramos de 2011 a 2040, 2040 a 2070 y 2070 a 2100.

En cuanto al desarrollo específico de las tareas del proyecto, la primera ha sido realizar una recopilación de información, tanto de los inventarios de deslizamientos de las distintas administraciones, como de los métodos existentes para el análisis de los riesgos.

De esta fase inicial, la principal conclusión es que la metodología del estudio a realizar, no puede basarse únicamente en un análisis estadístico de los deslizamientos catalogados, debido a un número insuficiente de datos y a la baja representatividad de los mismos (un gran número se localiza en los márgenes de las infraestructuras principales, siendo en la mayoría de estos casos, el factor antrópico el que ha generado dichos deslizamientos). Se opta por aplicar una metodología mixta, entre un análisis de tipo jerárquico analítico (para determinar el peso de los factores condicionantes de las inestabilidades) y métodos estadísticos (para definir los porcentajes de cada clase, dentro de cada factor).

Aplicando esta metodología, se obtiene en primer lugar un mapa de susceptibilidad del Territorio Histórico de Gipuzkoa.

Una vez definida la susceptibilidad se pasa a determinar la peligrosidad, añadiendo el efecto de los factores desencadenantes, en este caso las proyecciones de las precipitaciones realizadas por IHOBE.

Una vez realizado el mapa de peligrosidad, el siguiente y último objetivo del proyecto era generar un mapa de riesgos, en base a la previa creación de un mapa de vulnerabilidad. Aunque se ha conseguido recopilar gran cantidad de información en formato digital sobre elementos expuestos, tales como tipos de uso del suelo (residenciales, equipamientos e industrial), ubicación infraestructuras y situación de edificios en general (lo que incluye desde caseríos a cuerdas...), la determinación de la vulnerabilidad y la exposición van más allá de la cercanía a una zona de peligrosidad significativa, dicha proximidad no significa estrictamente que el riesgo sea alto, aunque es un primer punto de la evaluación a realizar.

La realización de un mapa de vulnerabilidad y exposición a escala del THG, es un trabajo tal, en cuanto a complejidad y envergadura, que merece de un proyecto *per se*, en el que colabore un equipo multidisciplinar. Por dar un esbozo del trabajo a realizar, sería necesario definir para cada elemento (desde edificios residenciales a infraestructuras) una serie de aspectos tales como número de vidas perdidas en caso de impacto de un deslizamiento, daños estructurales, pérdidas económicas tanto en edificios e infraestructuras, como los generados por falta de actividad, evaluación de posible contaminación por afección de deslizamientos en zonas industriales...etc.

Con la finalidad de que el proyecto alcanzara el máximo de objetivos marcados, y teniendo en cuenta que no es posible con los datos que se tienen, obtener un mapa de riesgo para todo el THG, se ha realizado una valoración de peligrosidad sobre los elementos expuestos, intentando dar una aproximación cualitativa de riesgo, en función de la proximidad de dichos elementos a zonas de peligrosidad de moderada a muy alta. Este análisis se ha realizado para el escenario 8.5 en la proyección 2011-2040 y se ha denominado análisis cualitativo del riesgo de elementos expuestos. Esta valoración se ha recogido en forma de fichas para cada área funcional del THG, describiéndose desde los municipios, a zonas rurales e infraestructuras principales de comunicación.

Finalmente, el documento recoge una serie de conclusiones de la evolución de la peligrosidad del THG frente a deslizamientos para los escenarios 4.5 y 8.5, en las tres

proyecciones climáticas (2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100). Estas conclusiones podrían resumirse, en que mientras que las principales zonas afectadas por peligrosidad moderada a muy alta son las mismas tanto para el escenario 4.5 como 8.5, la evolución en las tres proyecciones temporales es significativamente diferente. En el escenario 4.5 la peligrosidad en las distintas proyecciones aumenta de forma gradual, sin embargo, en el escenario 8.5 se da un fuerte incremento en la proyección 2010-2040, manteniéndose de forma muy similar en las siguientes proyecciones temporales (2040-2070 y 2070-2100).

Se ha incluido además al final del documento, un apartado en el que se recogen comentarios y recomendaciones sobre posibles mejoras a futuro de los resultados tanto de susceptibilidad como de peligrosidad, además de definir líneas de trabajo y metodologías para el desarrollo de un mapa de vulnerabilidad del THG.

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	10
2.	ANTECEDENTES.....	13
3.	OBJETIVOS DEL TRABAJO	15
4.	ANÁLISIS PRELIMINARES, CONCLUSIONES Y JUSTIFICACIÓN DEL PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO.....	17
5.	PLANTEAMIENTO DE TRABAJO	20
5.1	DESCRIPCIÓN GENERAL Y JUSTIFICACION	20
5.2	FASES DE ANÁLISIS Y MAPAS DERIVADOS	22
5.2.1	MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD	22
5.2.2	MAPA DE PELIGROSIDAD	25
5.2.3	MAPA DE VULNERABILIDAD.....	30
5.2.4	MAPA DE RIESGO	35
5.3	FICHAS-INVENTARIO POR ÁREAS FUNCIONALES.....	39
6.	MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD Y PELIGROSIDAD. GENERACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA.....	41
7.	MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD. DEFINICIÓN DE LOS FACTORES CONDICIONANTES.....	42
7.1	TIPOLOGÍA DE LA INESTABILIDADES ANALIZADAS.....	45
7.1.1	DESLIZAMIENTOS EN MASA	47
7.1.2	FLUJOS DE TIERRA Y BARRO	49
7.2	MÉTODO PARA LA GENERACIÓN DE LOS MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD	51
7.3	PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA. PONDERACIÓN DE FACTORES.....	53
7.3.1	RESULTADOS DEL AHP.....	55

7.4	PROBABILIDAD POR CLASES. MAPAS DERIVADOS Y TEMÁTICOS DE FACTORES CONDICIONANTES.....	58
7.4.1	PROBABILIDAD POR CLASES.....	58
7.4.2	MAPAS DERIVADOS.....	61
7.4.3	MAPAS TEMÁTICOS.....	72
8.	MAPAS DE PELIGROSIDAD. DEFINICIÓN DE LOS FACTORES DESENCADENANTES	79
8.1	DETERMINACIÓN DE LA PELIGROSIDAD PARA DESLIZAMIENTOS EN MASA.....	80
8.1.1	MAPAS GENERADOS. ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE HUMEDAD (TWI) Y ESCENARIOS CLIMÁTICOS	83
8.1.2	ANÁLISIS PREELIMINAR DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN MAPAS DE PELIGROSIDAD MASAS.....	85
8.2	DETERMINACIÓN DE LA PELIGROSIDAD EN INESTABILIDADES DE TIPO FLUJOS.....	86
8.2.1	MAPAS GENERADOS. ÁREA DE ACUMULACIÓN DE FLUJOS Y ESCENARIOS CLIMÁTICOS	88
8.2.2	ANÁLISIS PREELIMINAR DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN MAPAS DE PELIGROSIDAD FLUJOS.....	89
9.	RESULTADOS.....	90
9.1	MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD. RESULTADOS.....	90
9.1.1	MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD INESTABILIDADES TIPO FLUJO.....	91
9.1.2	MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTOS EN MASA.....	93
9.2	MAPAS DE PELIGROSIDAD	95
9.2.1	MAPAS DE PELIGROSIDAD FRENTE A INESTABILIDADES TIPO FLUJO	96
9.2.2	MAPAS DE PELIGROSIDAD FRENTE A DESLIZAMIENTOS EN MASA.....	104
9.3	COMPARACIÓN DE TENDENCIAS en escenarios 4.5 y 8.5 para AMBOS TIPOS DE DESLIZAMIENTOS.	113
9.3.1	EVOLUCIÓN DE LAS PROYECCIONES TEMPORALES PARA EL ESCENARIO 4.5	113

9.3.2	EVOLUCIÓN DE LAS PROYECCIONES TEMPORALES PARA EL ESCENARIO 8.5	116
10.	RECOMENDACIONES DERIVADAS DEL ANÁLISIS TERRITORIAL REALIZADO	117
11.	CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS	120
12.	BIBLIOGRAFÍA.....	121

ANEJOS

ANEJO 1: FICHAS ÁREAS FUNCIONALES

ANEJO 2: FICHAS TIPO TOMA DE DATOS DESLIZAMIENTOS

1. INTRODUCCIÓN

En el presente documento se recogen los resultados de la Asistencia Técnica para la realización del análisis y caracterización de los riesgos asociados a los deslizamientos o inestabilidades de laderas a los que se enfrentará el territorio histórico de Gipuzkoa bajo los escenarios de cambio climático.

Mediante el trabajo con herramientas tipo GIS (*Geographic Information System*), el documento presenta los resultados de interactuar un modelo geológico del territorio, que aborda los factores asociados a inestabilidades de ladera, con modelos realizados para escenarios climáticos futuros.

Estos modelos climáticos para escenarios futuros, son los aportados por IHOBE dentro del proyecto KLIMATEK. Los resultados se han obtenido para los escenarios climáticos RCP 4.5 (en adelante escenario 4.5) y RCP 8.5 (en adelante escenario 8.5) en diferentes intervalos temporales; 1970 a 2015 modelizando el periodo histórico y previsiones para los tramos de 2011 a 2040, 2040 a 2070 y 2070 a 2100.

Un aspecto importante, a destacar dentro del documento, es el trabajo previo de investigación y análisis. En este proyecto, se han recopilado las diferentes experiencias realizadas en trabajos anteriores, información referente a tesis doctorales, artículos científicos, trabajos previos y recomendaciones de paneles de expertos. Una vez analizada esta documentación y definidas las diferentes metodologías más adecuadas para abordar este tipo de análisis, se procedió al examen de la documentación de que se dispone. En base a todo ello, se definió la metodología más adecuada y los objetivos alcanzables, teniendo en cuenta los aspectos referentes a la documentación de partida.

Del análisis realizado se extrajeron una serie de conclusiones; la documentación de partida no posibilitaba la implementación de una metodología de trabajo basada en un análisis estadístico, y la modelización de los factores desencadenantes deberían, por tanto, realizarse en base a la interpretación y modelización del efecto que generan estos factores en el comportamiento geomecánico de las laderas.

Por todo ello, se vio la necesidad de trabajar mediante un criterio experto centrándose en la implementación de una suma ponderada de factores cuyas clases serían analizadas de manera estadística en base a documentación de otras experiencias similares.

Se realizó, además, un análisis crítico de cuál era la escala de trabajo más adecuada, con el objeto de dar validez y soporte científico a los resultados obtenidos. Teniendo en cuenta las características de la información de partida y la escala de análisis de los datos sobre los que se realizaron los mapas de factores desencadenantes, se determinó que la escala de trabajo deberá de ser igual o menor a 1/25.000.

Así mismo se comprobó que la generación de un Mapa de Riesgo requería de la realización previa de una evaluación de exposición y vulnerabilidad de todos los elementos existentes en el Territorio Histórico de Gipuzkoa (en adelante THG). Dicho esto, aunque se ha conseguido recopilar gran cantidad de información en formato digital sobre elementos expuestos, tales como tipos de suelo (residenciales, equipamientos e industrial), infraestructuras y edificios en general (lo que incluye desde caseríos a cuerdas...), la determinación de la vulnerabilidad y la exposición van más allá de la cercanía a una zona de peligrosidad significativa, dicha proximidad no significa estrictamente que el riesgo sea alto, aunque es un primer punto de la evaluación a realizar.

La realización de un mapa de vulnerabilidad y exposición a escala del THG, es un trabajo tal, en cuanto a complejidad y envergadura, que merece de un proyecto *per se*, en el que colabore un equipo multidisciplinar. Por dar un esbozo del trabajo a realizar, sería necesario definir para cada elemento (desde edificios residenciales a infraestructuras) una serie de aspectos tales como número de vidas perdidas en caso de impacto de deslizamiento, daños estructurales debidos a los deslizamientos, pérdidas económicas tanto en edificios e infraestructuras como los generados por falta de actividad, evaluación de posible contaminación por afección de deslizamientos en zonas industriales...etc.

Con la finalidad de que el proyecto alcance el máximo de objetivos marcados, y teniendo en cuenta que no es posible con los datos que se tienen obtener un mapa de riesgo para todo el THG, se ha realizado una valoración de peligrosidad sobre los elementos expuestos, intentando dar una aproximación cualitativa de riesgo, en función de la proximidad de dichos elementos a zonas de peligrosidad de moderada a muy alta. Este análisis se ha realizado para el escenario 8.5 en la proyección 2011-2040 y se ha denominado análisis cualitativo del riesgo de elementos expuestos. Esta valoración se ha recogido en forma de fichas para cada área funcional del THG, describiéndose desde los municipios, a zonas rurales e infraestructuras principales de comunicación. En el apartado 5.3 del presente documento se realiza una

descripción detallada del contenido de las fichas y se dan una serie de recomendaciones para su correcta interpretación y uso.

A su vez se aporta una herramienta GIS de análisis, la cual constituye un primer paso en el análisis de los riesgos que presenta la provincia, ya que se requiere de un ajuste de la misma en aspectos geológicos, mediante un inventario de deslizamientos que aporte información adecuada a incluir en el algoritmo de análisis, y un ajuste en los datos de entrada del mapa de factores desencadenantes ya que la escala de trabajo de los datos climáticos es de cuadrículas de 1 Km x 1 Km, mientras que la cuadrícula de los principales factores condicionantes es de 5 m x 5 m.

Finalmente, el documento aporta una serie de recomendaciones genéricas para poder abordar y gestionar de manera adecuada los riesgos geológicos derivados del cambio climático, se mencionan también una serie de líneas de trabajo, que como fruto de la elaboración de este proyecto se estima, según los autores del mismo, deberían desarrollarse para implementar en la herramienta GIS generada en este trabajo.

Las líneas de trabajo, pretenden crear información adecuada para poder desarrollar, como resultado final, una base de datos, que integrada a la herramienta GIS, genere información tal que permita trabajar a escalas más grandes, pudiendo de esta forma desarrollar un Mapa de Riesgos.

2. ANTECEDENTES

A modo de antecedentes incluimos la descripción aportada en el Pliego de Prescripciones Técnicas del trabajo desarrollado.

“Según el quinto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático (IPCC, por sus siglas en inglés) publicado en 2014, el clima de la Tierra ha sido alterado, siendo la causa más probable la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Como consecuencia de esto, los datos de temperatura de la superficie terrestre y oceánica combinados y promediados globalmente, calculados a partir de una tendencia lineal, muestran un calentamiento de 0,85°C durante el período 1880-2012. Asimismo, el informe del IPCC predice que las emisiones continuas de GEI causarán un mayor calentamiento y nuevos cambios en todos los componentes del sistema climático.

En base a las previsiones realizadas, los efectos del cambio climático podrían agruparse en 3 grupos: efectos sobre la termicidad (aumento de las temperaturas media y extremas), efectos en las zonas costeras (ascenso del nivel de mar) y efectos sobre las precipitaciones (variación del régimen de precipitaciones). Estos efectos, a su vez, generarán una serie de impactos, de diversa magnitud, sobre distintos aspectos del medio natural, social y económico.

La Estrategia Guipuzcoana de Lucha contra el Cambio Climático 2050 aprobada por Decreto Foral 18/2018, de 29 de mayo, recoge entre sus metas estratégicas la anticipación a los riesgos climáticos. Pretende evaluar su naturaleza e intensidad en función de los distintos escenarios y formular estrategias para la adaptación del territorio a corto, medio y largo plazo. Entre los diversos impactos que se plantean analizar en la estrategia se recogen los riesgos asociados a los deslizamientos o inestabilidades de laderas que puedan poner en riesgo la población y las infraestructuras.

La morfología del territorio hace de Gipuzkoa un espacio susceptible a los deslizamientos. Así mismo, considerando que la precipitación es el factor desencadenante más frecuente para la aparición de situaciones de inestabilidad de laderas y, según las previsiones, se trata de un factor condicionado por la previsible variación del régimen de precipitaciones como consecuencia del cambio climático, es oportuno realizar un estudio que permita definir estrategias para la mejora de la resiliencia del territorio”

En definitiva y en base a la reflexión implícita en los párrafos anteriores, diremos que queda patente el dotarse de una herramienta que pueda analizar el estado y evolución de los riesgos geológicos por inestabilidades de ladera en base a los efectos derivados del cambio climático. Esta herramienta debe de poder generar información suficiente para poder orientar en las directrices de gestión del territorio, concretamente en la ordenación del territorio y criterios técnicos para abordar aspectos de gestión del riesgo por inestabilidades de laderas.

3. OBJETIVOS DEL TRABAJO

Los objetivos de partida de este trabajo han sido los siguientes:

1. Delimitar y cartografiar el territorio en base a la susceptibilidad de sufrir deslizamientos de laderas.
2. Analizar y cartografiar la peligrosidad o probabilidad de deslizamiento de laderas bajo escenarios de cambio climático.
3. Identificar las zonas urbanas e infraestructuras con mayor exposición y vulnerabilidad ante los deslizamientos.

El primer objetivo se afrontó mediante la modelización del territorio en referencia al comportamiento geomecánico o factores gobernantes frente a deslizamientos de tipo de movimientos en masa de grandes dimensiones (en los que es la calidad del macizo rocoso uno de los condicionantes o factores) y deslizamientos del tipo flujo. El resto de inestabilidades (caída de bloques y deslizamientos con control de geología estructural, etc...) no se pudieron modelizar debido a la escala de análisis que requieren (en torno a 1/1000 o 1/2000) y las características de los datos de partida.

En referencia a la gestión o modelización de la probabilidad de ocurrencia de los deslizamientos, hay que remarcar que únicamente se han modelizado las inestabilidades que están gobernadas por las variaciones de presiones de agua. Estas variaciones se han modelizado de diferentes maneras en función del tipo de inestabilidad. Existen otro tipo de factores desencadenantes que generan inestabilidades en la provincia, son los factores derivados de la actividad antrópica (excavaciones, rellenos, muros de contención, etc...). Estos factores son los responsables de la mayoría de inestabilidades que se producen y además los que presentan mayor impacto socio-económico. El análisis de este tipo de situaciones requiere una escala de trabajo (escala 1/1000) que queda fuera del ámbito del proyecto. En consecuencia, este tipo de inestabilidades no se han contemplado en el análisis realizado.

Finalmente, el análisis asociado a las zonas urbanas y su exposición o vulnerabilidad, se gestionó mediante un trabajo de análisis espacial entre las zonas urbanas de diferente naturaleza, y la clasificación frente a la peligrosidad del entorno de las zonas a estudio, lo cual se ha plasmado en las fichas realizadas para cada área funcional (ver apartado 5.3), a esta evaluación se la ha denominado análisis cualitativo del riesgo de elementos expuestos. Cabe

recordar que no es un análisis de riesgo *sensu stricto* debido a que, para ello al menos se requieren de mapas de vulnerabilidad y una escala de trabajo mayor que defina la exposición de los elementos, integrando las trayectorias de las masas deslizadas.

Con esta serie de condicionantes de partida, **se optó por desarrollar una herramienta de trabajo que permitiera realizar análisis de carácter genérico**. Es decir, se analizan movimientos de ladera que se puedan modelizar con la información disponible, ajustando la escala de análisis, y que a su vez proporcionen resultados adecuados referentes a la evolución de la sensibilidad del territorio a inestabilidades de ladera de carácter muy genérico.

Esta herramienta de trabajo constituye, por tanto, una base sobre la cual se puede implementar a futuro información adecuada para ajustar los modelos de comportamiento del terreno, aspectos climáticos y aspectos referentes a elementos vulnerables.

4. ANÁLISIS PRELIMINARES, CONCLUSIONES Y JUSTIFICACIÓN DEL PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO.

La primera fase del trabajo realizado, ha consistido en analizar la información de la que se dispone para poder alcanzar los objetivos inicialmente marcados.

Para el análisis de la información a incorporar en el modelo de susceptibilidad y peligrosidad, se comenzó por investigar los datos de los deslizamientos que históricamente se han dado en la provincia y han sido recogidos en diferentes documentos. La información analizada se ha obtenido de diferentes fuentes, principalmente de organismos oficiales como la Diputación Foral de Gipuzkoa y Bidegi. Los datos aportados no presentan la información adecuada o suficiente para poder utilizarlos en un análisis estadístico. Debido a que las fuentes son diferentes y a que el objetivo de los trabajos relacionados con los datos de los deslizamientos, la información asociada a cada deslizamiento es de carácter diferente y por lo tanto no se puede obtener información adecuada y suficiente para su tratamiento estadístico. En este sentido diremos que muchos de los deslizamientos aportados están relacionados a incidencias de explotación de infraestructuras, en estos casos los aspectos referentes a la escala y naturaleza de la inestabilidad hacen difícil la extracción de datos válidos o apropiados. Otro aspecto determinante es que en muchos casos el factor desencadenante de la generación de las inestabilidades está estrechamente ligado a la actividad humana, generación de excavaciones presencia de muros de contención, modificaciones en drenajes, etc... aspectos estos que no se contemplan en el análisis que se plantea realizar (debido a que la escala de análisis ha de ser de 1/1000 o superior).

Por otro lado, se analizaron los datos referentes a la información “geológica o geomorfológica” del terreno, es decir la información que se dispone para la elaboración de los mapas que van asociados a los factores condicionantes de los deslizamientos a estudio. Así diremos que los datos referentes a la litología de los materiales están recogidos en los mapas de la colección del EVE a escala 1/25000, aspecto éste que condiciona la capacidad resolutive de escala de análisis. Por otro lado, no se posee una información adecuada de un factor fundamental que es el espesor de suelos. Se ha contado con alguna capa de GIS (SHP) de espesores de suelos, pero estos hacen referencia fundamentalmente a los suelos de naturaleza aluvial o de pie de monte, zonas poco susceptibles de sufrir deslizamientos. El resto de factores, los derivados principalmente del factor geomorfológico, se han obtenido de los

modelos digitales del terreno incluidos en la plataforma de GeoEuskadi. Esta información presenta una cantidad y calidad adecuada para poder trabajar a escala algo menor de 1/25.000, siendo la escala máxima adecuada en torno a 1/10.000. Sobre esta información y aplicando los algoritmos adecuados, se ha podido generar una serie de mapas necesarios para la realización del trabajo.

Otro aspecto que resulta fundamental destacar, es que la resolución de los mapas derivados de los modelos climáticos presenta una escala de trabajo muy pequeña con cuadrículas de trabajo de 1Km x 1Km. Este aspecto condiciona enormemente la capacidad o la escala resolutive de los análisis que se puedan realizar. Hay que recordar también que la orografía, principalmente diferencias de cotas relativas y orientación de los sistemas montañosos en relación al tipo de frente de precipitaciones, vientos asociados, etc... son factores determinantes a la hora de generar las precipitaciones sobre el territorio, en referencia a aspectos de acumulaciones e intensidades de lluvia.

En referencia a la información necesaria para abordar los aspectos del concepto del Riesgo, diremos que se posee información digital de los diferentes elementos arquitectónicos que hay en el ámbito de trabajo; edificaciones e infraestructuras. No obstante, no se posee de una información referente a la categorización de estos elementos en referencia a su vulnerabilidad; ordenando los diferentes elementos en base a criterios estratégicos de gestión del territorio, evaluación de afecciones a vidas humanas, pérdidas económicas, etc... Por lo tanto, resulta poco viable la realización de un análisis que incorpore este aspecto de vulnerabilidad. En referencia a la exposición (otro aspecto importante a la hora de analizar el Riesgo) diremos que el modelo que se puede generar con los datos disponibles no aporta información suficiente para abordar aspectos como la trayectoria de impacto.

Con todo ello, se llegó a la conclusión de que el modelo de trabajo a realizar debe basarse en un "Criterio Experto" reduciendo al máximo los aspectos estadísticos. Este modelo estará fuertemente condicionado por la información geológica de base, en referencia a la presencia de espesores de suelos acumulados, y condicionado también por la información de carácter climática. La escala de análisis no deberá por tanto ser superior a 1/25000.

Se llegó también a la conclusión que el trabajo a desarrollar debería quedarse o avanzar hasta generar un mapa de Peligrosidad sobre el cual se podrían realizar análisis a escala de

comarca incorporando en algunos casos elementos de infraestructuras y viendo la interacción espacial entre los diferentes aspectos.

El modelo de análisis planteado basado en Criterio Experto pretende modelizar desde el punto de vista de la probabilidad de ocurrencia, los procesos naturales que son generadores de inestabilidades. Para ello, el modelo o la herramienta de análisis debe de abordar los siguientes aspectos:

- Al centrarse en la reproducción de procesos físicos-mecánicos de la naturaleza, requiere de la determinación, modelación y de la interacción entre factores diferentes que intervienen en el proceso. Factores de carácter geológico, geomorfológico y climáticos.
- La herramienta debe de contener un algoritmo de gestión de los diferentes factores y clases asociadas, los cuales deberán de ser ponderados de manera adecuada para cada proceso a modelizar.
- Las tipologías de inestabilidades a analizar, deberán ser las que de alguna manera presenten o sean indicadores eficaces de la susceptibilidad del territorio a presentar inestabilidades frente al cambio climático. En este sentido diremos que se han planteado dos tipologías de inestabilidades a analizar.

Deslizamientos en masa, esta tipología está directamente asociada al concepto de precipitaciones acumuladas principalmente en períodos de tiempo de 5 a 10 días. Los efectos de lluvias intensas están más asociados a inestabilidades de flujo de barro o debri flow, siendo esta la otra tipología a estudio. Debido a la información disponible y la escala de trabajo los deslizamientos con comportamiento estructural, caídas de bloques y los derivados de la acción antrópica no son objeto de análisis.

5. PLANTEAMIENTO DE TRABAJO

Tras el análisis realizado y las conclusiones obtenidas, a continuación, se incluye una descripción de la metodología seguida.

5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL Y JUSTIFICACION

La metodología seguida se centra en el desarrollo de un Análisis de Criterio Experto, ello es debido a que no se posee información suficiente para desarrollar el análisis basándose en datos estadísticos y por el contrario se poseen datos suficientes para alimentar una herramienta de análisis con criterio experto.

Los análisis a realizar se centran en la modelización de los procesos físico-mecánicos que se asocian a las inestabilidades de ladera, inestabilidades del tipo de movimiento en masa (rotacionales y traslacionales poco evolucionados) y procesos de tipo flujos de tierra y barro.

Por un lado, parte de los procesos se centran en la resolución de estados tensionales originados en el terreno. Estos estados son el resultado de la generación de esfuerzos en el terreno debido a aspectos geométricos del mismo. la resolución de estos estados tensionales viene relacionada con la capacidad resistente del terreno y sus variaciones, asociadas estas a la presencia de agua a modo de presiones en los poros del material. Para estos casos el grado de saturación del terreno resulta ser el factor desencadenante de la inestabilidad. Este modelo de comportamiento está directamente asociado a los deslizamientos en masa.

Por otro lado, se analizan los procesos erosivos, procesos que están asociados a un estrés hidráulico de corrientes o escorrentías superficiales sobre los materiales de la superficie del terreno. Para estos casos la modelización de la concentración de las aguas superficiales discurriendo sobre el terreno resulta ser fundamental. Este modelo de análisis está asociado a las inestabilidades de carácter flujo de barro o debris flow.

La herramienta que permite la modelización de los dos procesos anteriormente definidos lo constituye un algoritmo de análisis. Este algoritmo permite incorporar en cada caso los factores que intervienen en el proceso; incorporando factores de diferente naturaleza, los cuales son ponderados en base a su efecto en el proceso. Dentro de cada factor se definen una

serie de clases, las cuales se ponderan en base a criterios estadísticos obtenidos de experiencias anteriores en trabajos similares.

El algoritmo de análisis se incorpora dentro de una herramienta de tipo Sistema de Información Geográfica, la cual mediante la superposición de mapas y realizando álgebra de mapas permite obtener los resultados.

El sistema planteado presenta las siguientes ventajas:

- Es ajustable en base a la necesidad del tipo de análisis a realizar. De tal manera que a medida que se requiera implementar otro tipo de inestabilidad al análisis se pueda realizar de manera sencilla.
- Es actualizable en base a la creación y alimentación de una base de datos de deslizamientos de la provincia. Este aspecto resulta fundamental para el ajuste del modelo en referencia a los pesos de los factores y la clasificación estadística de las clases asociadas.
- También es modificable en base a nuevos criterios o factores de análisis, en referencia a la posibilidad de plantear modificaciones o ajustes en los factores desencadenantes etc...

5.2 FASES DE ANÁLISIS Y MAPAS DERIVADOS

Del análisis realizado, según la metodología anteriormente descrita, se obtienen una serie de resultados, los cuales se expresan en forma de mapas, por ser estos un método tanto efectivo, como intuitivo y manejable, de presentar los datos obtenidos.

Siguiendo la metodología planteada, el análisis se desarrolla de forma paralela, pero diferenciada, para los deslizamientos en masa y para las inestabilidades tipo debris o flujos de barro.

Para llegar a obtener un mapa de riesgo es necesario realizar un análisis por niveles o fases. En **primer lugar**, se genera un **Mapa de Susceptibilidad** (análisis de factores condicionantes), en la **segunda fase** a los factores condicionantes se les unen los desencadenantes, obteniéndose así un **Mapa de Peligrosidad o de probabilidad de ocurrencia**, finalmente el **Mapa de Riesgo** se genera superponiendo un mapa de vulnerabilidad al de peligrosidad.

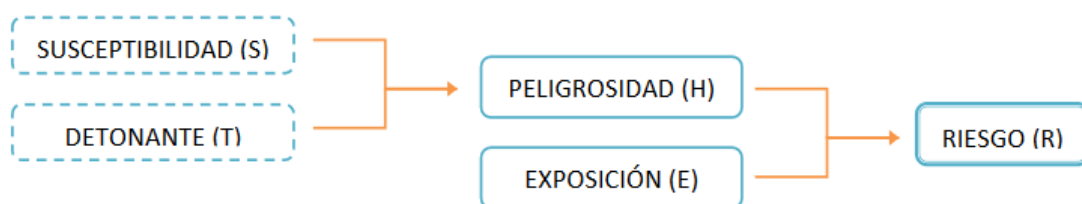


Figura 1. Esquema del proceso para la realización de los mapas de susceptibilidad, peligrosidad y riesgo.

A continuación, se define el proceso por el cual se obtienen los distintos tipos de mapas, los datos necesarios para su elaboración y la información que se extrae de ellos.

5.2.1 MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD

La susceptibilidad se define como la posibilidad de que una zona quede afectada por un determinado proceso y depende de los factores que condicionan las inestabilidades, pudiendo estos ser de naturaleza intrínseca a los materiales (tales como la litología) o externos (como los relacionados con el relieve). Estos factores se definen como condicionantes o pasivos.

En definitiva, son mapas que indican zonas que muestran cuanto de favorables son las condiciones respecto a la generación de inestabilidades del terreno. La susceptibilidad será por tanto el resultado de una relación entre diferentes factores que están implicados en el proceso. Cada factor tendrá diferente peso en la evaluación (ponderación) y será diferente dicha ponderación en función del tipo de inestabilidad a la que haga referencia el análisis.

Tal y como se ha comentado anteriormente, el modelo de análisis **intenta reflejar los procesos físicos que se dan en los dos tipos de deslizamientos a analizar, deslizamientos en masa y deslizamientos de flujos o debris flow.**

Los deslizamientos en masa se producen por una **resolución o evolución de un estado tensional que se produce en el terreno.** En resumen, una masa de suelo que presenta unas características mecánicas o resistentes (factor GSI, Índice de Calidad geológica) se ve sometida a un estado tensional resultado de su localización dentro de una ladera (factor RTP) y de la pendiente de la misma (factor Pendiente). En función de la relación entre la resistencia del suelo y las solicitaciones tensionales la zona será más propensa o no a que se generen deslizamientos.

En el caso de los **deslizamientos tipo flujo**, el proceso natural hace referencia a **la generación de esfuerzos de tipo hidráulico sobre un tipo determinado de material.** Así, en estos casos cobra importancia la forma de discurrir la escorrentía superficial (Factor Curvatura del terreno) y la proximidad a zonas de cauce (Factor Distancia al cauce). Otro factor que interviene es la presencia de masa forestal o cultivos en la zona (Factor usos del Suelo).

Se muestran en forma de tabla, los factores desencadenantes de cada tipo de inestabilidad (deslizamiento en masa y flujos) y las capas del GIS (factores) a las que corresponden en el análisis realizado.

	Factores	Influencias y efectos
Condicionantes	Relieve	Distribución de esfuerzos
		Estado tensional
		Presiones de agua
		Acumulación de agua
	Litología (composición, textura).	Densidad, resistencia. Comportamiento hidrogeológico
	Estructura geológica	Zonas de debilidad del terreno por procesos de fracturación. Zonas de debilidad
	Propiedades geomecánicas de los materiales	Hace referencia a la “resistencia” de los materiales. Combina litología, meteorización y fracturación.
Deforestación	Erosión, efecto de la cobertura vegetal frente a erosión	
Meteorización	Cambio físicos y químicos, erosión externa e interna, generación de zonas de debilidad	

Cuadro 1. Resumen factores condicionantes en la generación de deslizamientos.

5.2.2 MAPA DE PELIGROSIDAD

La peligrosidad se define como la probabilidad de ocurrencia de un evento en un área, para un periodo de tiempo determinado. El mapa de peligrosidad, es una combinación entre los factores que dan la susceptibilidad del terreno y los factores desencadenantes de las inestabilidades:

- **Factores condicionantes** (pasivos e internos). Modelizado en **mapas de susceptibilidad**.
- **Factores desencadenantes** (activos y externos).

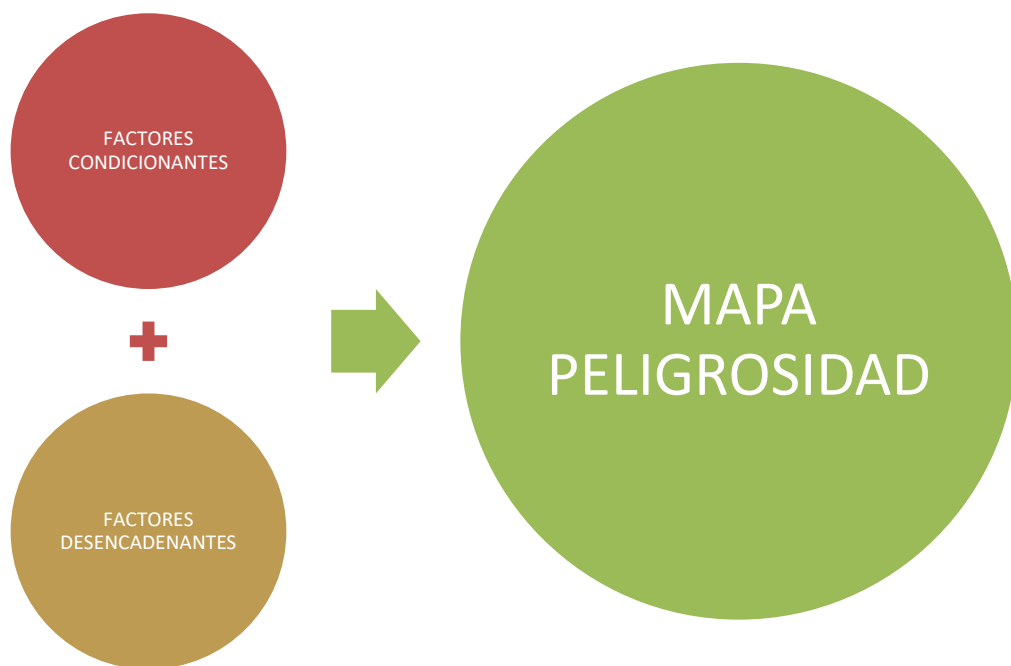


Figura 2. Esquema conceptual generación de mapas de peligrosidad.

Para realizar, por tanto, el mapa de peligrosidad es necesario modelizar en esta fase, los factores desencadenantes. Estos se consideran factores externos, son los responsables de **ACTIVAR** las inestabilidades, y están **directamente relacionados con la magnitud y la velocidad de los deslizamientos**.

Los **factores desencadenantes** que generalmente originan los deslizamientos son los siguientes:

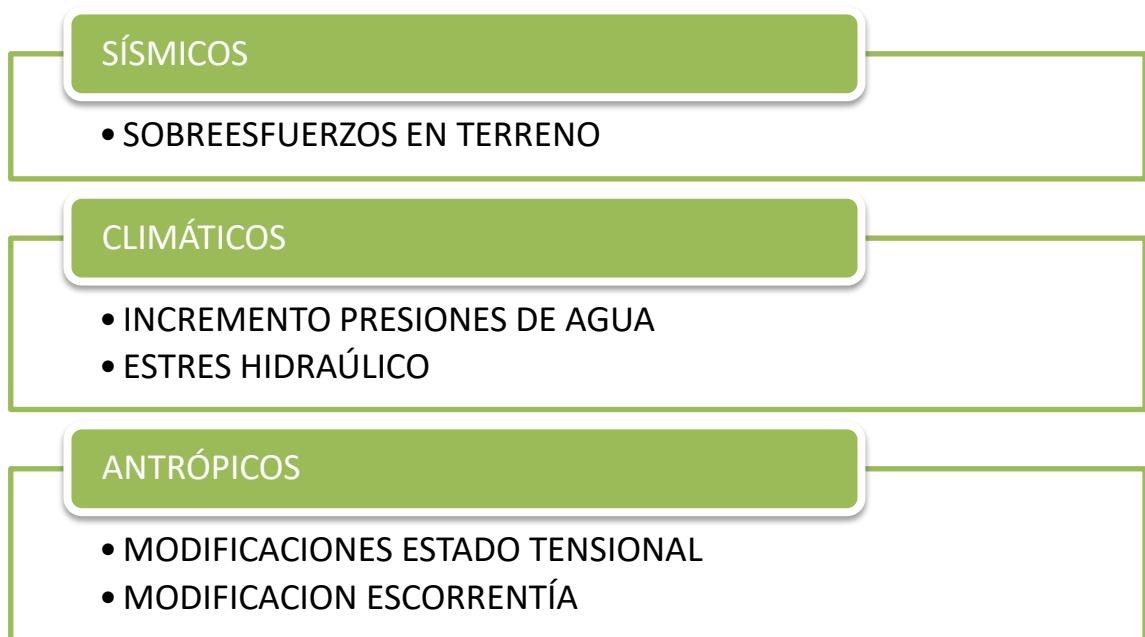


Figura 3. Posibles factores desencadenantes en la generación de deslizamientos.

Se describen a continuación:

- Sismos o terremotos: procesos que generan esfuerzos mayores por efecto de una aceleración adicional sobre los materiales del terreno.
- Factores climáticos: referentes principalmente a precipitaciones en forma de lluvia. Se podrían diferenciar en dos clases:

- ✓ Los que generan situaciones de incremento de presiones de agua en los materiales reduciendo su resistencia al corte. Procesos estos asociados a períodos de precipitaciones continuas, con importantes acumulados.
 - ✓ Los que generan un incremento de estrés hidráulico y originan procesos de erosión. Asociados a precipitaciones intensas, tormentas o períodos de lluvia cortos con fuertes intensidades.
- Factores antrópicos: procesos de la actividad humana que modifican la superficie del terreno, los efectos son los siguientes:
 - ✓ Cambios en el estado tensional de los materiales: asociados a movimientos de tierras de mediana o gran entidad; excavaciones y generación de rellenos.
 - ✓ Actuaciones de generación de modificaciones en la escorrentía superficial, generando acumulaciones de flujos de agua e incrementando la erosión; pistas forestales u otro tipo de obras.

En la siguiente tabla se muestra de forma resumida los factores desencadenes existentes y como se han tratado en el análisis realizado:

FACTOR DESENCADENANTE	EFECTO SOBRE EL TERRENO	OBSERVACIONES
SISMOS- TERREMOTOS	Sobreesfuerzos en el terreno	Se ha descartado el factor sísmico como desencadenante para la realización de los mapas de peligrosidad, por no ser el THG una zona activa.
CLIMÁTICOS	<p>Incremento de presión de agua en el terreno (periodos de acumulados de precipitación)</p> <p>Incremento de estrés hidráulico y originan procesos de erosión (periodos cortos de precipitación con altas intensidades)</p>	<p>Se modeliza en los mapas de peligrosidad para los dos tipos de deslizamientos que se analizan:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Precipitaciones acumuladas. • Precipitaciones intensas.
ANTRÓPICOS	<ul style="list-style-type: none"> • Cambios en estado tensional. Asociados a movimientos de tierras. • Modificaciones de la escorrentía superficial. 	No se contemplan en este trabajo, puesto que este debe ser realizado a escalas de 1/2000 o mayores, acompañados de estudios de carácter determinísticos

Cuadro 2. Exposición de factores desencadenantes, descripción y observaciones sobre los mismos.

5.2.2.1 Mapa de Factores Desencadenantes

Se ha realizado el mapa de factores desencadenantes para deslizamientos en masa y debris, analizándose las precipitaciones junto con factores hidrogeológicos o hidrológicos.

A continuación, se explican los procesos del análisis realizado para la modelización de los factores desencadenantes en ambos tipos de deslizamientos.

Factores desencadenantes de deslizamientos en masa:

Para elaborar la cartografía de peligrosidad ante deslizamientos de masas (rotacionales o traslacionales), se ha tomado como **factor detonante del proceso la saturación del suelo**, debido a que estos procesos se desencadenan con gran frecuencia (siempre que se produzcan sin intervención humana) por un aumento de la presión en poro de los materiales.

El efecto del agua en el terreno da lugar a presiones que alteran los estados tensionales, por presiones intersticiales y aumento del peso del terreno, se producen además procesos de erosión interna y externa, todo lo cual da lugar a **modificación de las propiedades y resistencia de los materiales**.

Factores desencadenantes de flujos de tierra y barro:

Por otra parte, para elaborar la cartografía de peligrosidad ante inestabilidades de tipo flujos, se ha tomado como factor detonante la escorrentía superficial. Para ello, se considera, por una parte, el agua que precipita en periodos intensos de lluvias y, por otra, la cantidad de escorrentía superficial que pasa por una determinada zona en función de la cuenca que se sitúa tras él.

5.2.3 MAPA DE VULNERABILIDAD

Tal y como se ha mencionado en apartados anteriores la vulnerabilidad no sólo depende de su ubicación o usos, sino de factores tales como el tipo de cimentación de los edificios en cuestión, de la tasa de ocupación de esos edificios, en el caso de suelo residencial, equipamiento o industrial. Para infraestructuras sería necesario determinar la cantidad de tráfico que soporta cada tramo de vía para poder hacer una valoración de vulnerabilidad, dicho esto se puede llegar a la conclusión de que la realización de un mapa de vulnerabilidad a escala del THG, supone el análisis y valoración de multitud de datos de ámbitos de conocimientos diferentes y que por ello es un objetivo de tal envergadura que requeriría de la realización de un proyecto propio y de la colaboración estrecha de distintos departamentos y organismos de la administración (desde el EVE hasta URA pasando por SOS deiak, BIDEGI y la propia Diputación).

Para subsanar la carencia de este mapa, se ha realizado un análisis de los elementos expuestos en función de su cercanía a zonas de peligrosidad significativa.

No obstante, y para que el presente proyecto sirva además de instrumento de consulta, además de sentar las bases para futuros trabajos que complementen el actual, se desarrolla a continuación el concepto de vulnerabilidad.

La vulnerabilidad se define como la propensión de los elementos expuestos a ser afectados. El mapa de vulnerabilidad, recoge los elementos expuestos que pudieran ser afectados por un eventual proceso de inestabilidad y el grado de pérdida o destrucción de un elemento o grupo de elementos como resultado de la ocurrencia de un fenómeno natural de magnitud determinada (Varnes, 1984).

Para ello, en primer lugar, se identifican dichos elementos, los cuales pueden ser definidos como vulnerables en función de sus características sociales, medioambientales, económicas o estructurales y de pérdida de vidas.

A modo resumen y como ejemplos, para valorar la vulnerabilidad de las vías de transporte, no sólo es necesario definir cuáles son las de mayor tráfico, sino identificar las comunicaciones esenciales que impiden que algunas zonas queden incomunicadas. Además sería necesario identificar sus elementos más vulnerables, tales como viaductos, desmontes bajo laderas en

situación de peligrosidad y las consecuencias estructurales de recibir un impacto generado por cada tipo de inestabilidad.

De los elementos existentes en las zonas habitadas, definir tanto en los de uso público como privado, su nivel de exposición, en función de su ubicación y de su capacidad a la hora de recibir un impacto generado por un deslizamiento (cabe recordar que la valoración puede realizarse en sentido económico y/o de pérdida de vidas).

A continuación, se recogen distintas tablas en las que se proponen valores de vulnerabilidad, las primeras para el efecto sobre las vidas humanas y la siguiente para las consecuencias en los edificios:

Tabla 13.17 Valores de vulnerabilidad recomendados en Hong Kong (Finlay y otros, 1997).

VULNERABILIDAD DE UNA PERSONA EN UN AREA ABIERTA			
Caso	Rango de Valores Históricos	Valor Recomendado	Comentarios
1. Es golpeado por un caído de roca.	0.1 – 0.7	0.5 (1)	Puede ser herido, pero rara vez causa la muerte.
2. Es sepultado por un flujo de detritos.	0.8 – 1.0	1.0	Muerte por asfixia.
3. No es sepultado.	0.1 – 0.5	0.1	Alta probabilidad de supervivencia.
Nota: (1) La proximidad de la persona debe considerarse en más detalle.			
VULNERABILIDAD DE LA PERSONA EN UN VEHICULO			
Caso	Rango de Valores Históricos	Valor rRecomendado	Comentarios
1. Si el vehículo es sepultado o destruido.	0.9 – 1.0	1.0	La muerte es casi segura.
2. Si el vehículo es dañado solamente.	0.0 – 0.3	0.3	Alta probabilidad de supervivencia.
VULNERABILIDAD DE LA PERSONA EN UN EDIFICIO			
Caso	Rango de Valores Históricos	Valor Recomendado	Comentarios
1. Si el edificio colapsa.	0.9 – 1.0	1.0	La muerte es casi segura.
2. Si el edificio es inundado con residuos del deslizamiento y la persona es sepultada.	0.8 – 1.0	1.0	La muerte es muy probable.
3. Si el edificio es inundado con residuos del deslizamiento y la persona no es sepultada.	0.0 – 0.5	0.2	Alta probabilidad de supervivencia.
4. Si los residuos golpean al edificio solamente.	0.0 – 0.1	0.05	Virtualmente no hay peligro. (1)
Nota: (1) Debe tenerse en cuenta la proximidad de la persona a la parte del edificio afectada por el deslizamiento.			

Figura 4. Extracto del libro Deslizamientos. Tomo I. Análisis Geotécnico. Jaime Suárez. Se recogen distintas valoraciones de vulnerabilidad respecto al efecto sobre pérdidas de vidas humanas, usadas por el Gobierno de Hong Kong.

Profundidad de la Cimentación (incluyendo pilotes), metros	Profundidad del Deslizamiento, metros	Vulnerabilidad
≤ 2	< 2	1.0
> 2	< 2	0
Menos que la profundidad del deslizamiento	2 -10	1.0
10 – 13	2 -10	0.5 – 1.0
> 13	2 -10	0 – 0.5*
Cualquiera	>10	1.0**

Figura 5. Extracto del libro *Deslizamientos. Tomo I. Análisis Geotécnico*. Jaime Suárez. Valores de vulnerabilidad de estructuras en función de la profundidad de la cimentación.

En este punto cabe señalar que las trayectorias de los posibles deslizamientos que pudieran producirse, sólo son analizables a partir de modelos determinísticos y/o tensodeformacionales del terreno, los cuales únicamente pueden calcularse a una escala de trabajo próxima a 1/1000, y para lo cual es esencial definir tanto el modelo geomecánico de comportamiento como los parámetros geotécnicos. Para ello es imprescindible realizar una cartografía geológico-geotécnica y una campaña de investigación (tanto de campo como de laboratorio).

La vulnerabilidad por tanto es un concepto que abarca diferentes aspectos. Queda definida como “*el grado de pérdida o destrucción de un elemento señalado o de un grupo de elementos en riesgo, como resultado de la ocurrencia de un fenómeno natural de magnitud determinada (Varnes, 1984). El grado de daño a la población, vidas humanas, propiedades, actividades económicas, servicios públicos, condiciones ambientales etc., en un área específica por la ocurrencia de un determinado evento.*”

La valoración de la vulnerabilidad puede definirse como el nivel potencial de daño o grado de pérdida de un determinado elemento, expresado en una escala de 0 a 1, donde:

$$V = V_s \times V_t \times V_l$$

V_s = Probabilidad del impacto espacial del deslizamiento sobre el elemento.

V_t = Probabilidad en el tiempo (donde se encuentre el elemento durante el impacto).

V_l = Probabilidad de pérdida de vida o proporción del valor del elemento.

La vulnerabilidad depende principalmente de la exposición del elemento a la amenaza. Los valores fundamentales a tener en cuenta se muestran en la siguiente gráfica.

Descripción de Vulnerabilidad	Rango de Pérdida	Índice
Elementos ambientales intactos	0	0
Pérdidas ambientales locales	1 - 25%	0.25
Pérdidas ambientales serias, pero reparables	26 - 50%	0.5
Daños ambientales muy grandes, difíciles de reparar	51 - 75%	0.75
Destrucción total del medio ambiente físico	76 - 100%	1

Figura 6. Extracto del libro Deslizamientos. Tomo I. Análisis Geotécnico. Jaime Suárez. Valores de vulnerabilidad ambiental (Imiriland, 2007).

De todo ello se depende que la elaboración de un mapa de Vulnerabilidad deberá de ser realizado por un equipo de expertos multidisciplinar. Este análisis deberá de estar íntimamente ligado a criterios de gestión del territorio.

En el momento de la realización de este trabajo no se dispone de un mapa de Vulnerabilidad del territorio de Gipuzkoa.

5.2.4 MAPA DE RIESGO

Para la realización de un mapa de riesgo es necesario haber generado previamente un mapa de vulnerabilidad. Tal y como se ha comentado en el punto anterior no se cuenta con este mapa por lo que no es viable generar un mapa de riesgo en sentido estricto. Aun así, se ha realizado una valoración de los elementos expuestos en base a su proximidad a zonas de peligrosidad, lo que se ha denominado como análisis cualitativo del riesgo de elementos expuestos, recogido en las fichas de áreas funcionales. En este apartado, no obstante, se recoge la definición del concepto de riesgo.

Riesgo es el número esperado de vidas humanas perdidas, personas heridas, daño a la propiedad y pérdidas económicas y ambientales, relacionadas con la ocurrencia de un determinado fenómeno (Varnes 1984). En la práctica, el riesgo está definido por la magnitud de las consecuencias de la amenaza. Definiéndose el riesgo de la siguiente manera:

$$\text{Riesgo} = \text{Detonante} \times \text{Susceptibilidad} \times \text{Potencial} \times \frac{\text{Exposición}}{\text{Resistencia}} \quad (\text{Duque, 2000})$$

Un estudio completo de riesgos, debe definir el número de personas amenazadas, así como las propiedades y el medio ambiente. El cálculo del riesgo es primariamente, un tratamiento matemático, basado en la amenaza, los elementos en riesgo y la vulnerabilidad de éstos; para ello, se recurre al álgebra probabilística (como podrían ser árboles de eventos), o bien, a métodos de confiabilidad o simulación.

La evaluación del riesgo R involucra la noción de amenaza, vulnerabilidad y costo. “Matemáticamente” se define como: (Mendoza y Domínguez, 2005)

$$R = \sum_i A_i \times \left[\sum_j V_{ji} \times C_j \right]$$

Donde:

- A_i = es la amenaza i
- V_{ji} = es la vulnerabilidad de los elementos j para la amenaza i
- C_j = es el “costo” o valor del elemento j

El análisis del riesgo requiere investigar:

- ¿Qué puede ocurrir? (Análisis de la amenaza).
- ¿Probabilidad de que ocurra? (Probabilidad de la amenaza).
- ¿Cuáles serían las pérdidas o daños? (Análisis de consecuencias).

- ¿Realmente importa? (Evaluación del riesgo).
- ¿Qué se puede hacer con el riesgo? (Manejo del riesgo).

La caracterización debe definir la existencia de situaciones de riesgo localizado o generalizado. En el caso del riesgo localizado, se deben identificar los puntos y las áreas de riesgo dentro de una determinada área estudiada. Además, se debe definir si se trata de un riesgo temporal o de un riesgo permanente o a largo plazo.

El riesgo se puede analizar desde diferentes puntos de vista, todos ello requiere de un conocimiento muy detallada del medio físico que se analiza, la escala de análisis ronda el 1/5.000 a 1/500 superior.

Los diferentes tipos de riesgos que se pueden analizar son los siguientes:

- **Riesgo social o humano:** incluye los muertos y los desaparecidos, los heridos y discapacitados, o lesiones personales, como resultado de la acción de un deslizamiento. Los aspectos que se deben analizar se incluyen en las siguientes tablas:

Población Afectada	A Número de Personas	B Factor de Presencia	Población Amenazada = Ax B
Residentes			
Personas que viven permanentemente		1	
Personas que vienen los fines de semana (cabañas)		0.3	
Personas que permanecen en hoteles (Número de camas)		0.5	
Pacientes en hospitales (Número de camas)		1	
Pacientes en Ancianatos (Número de camas)		1	
Visitantes de día			
Número de empleados de oficinas o fábricas, alumnos y niños en colegios		0.35	
Número promedio de clientes de almacenes y Centros comerciales		0.008	
Otros visitantes ocasionales		0.008	
Personas en Automóviles y autobuses			
Más de 5000 vehículos promedio por día		0.01	
500 a 5000 vehículos por día		0.005	
Menos de 500 vehículos por día		0.001	

Figura 7. Extracto del libro Deslizamientos. Tomo I. Análisis Geotécnico. Jaime Suárez. Análisis del riesgo con relación a las personas (Bergren y otros, 1992).

Tabla 13.21 Análisis de riesgo con relación a propiedades (Bergren y otros, 1992).

Propiedades Afectadas	Número de Unidades	Factor de Cálculo	Valor de las Propiedades Amenazadas en Dólares
Casas		Valor unitario	
Casas de área menor a 90 m ²			
Casas de área de 90 a 130 m ²			
Casas de área de 130 a 200 m ²			
Casas de área de más de 200 m ²			
Edificios		Valor por m ²	
Metros cuadrados de edificios de vivienda			
Metros cuadrados de escuelas, oficinas y almacenes			
Metros cuadrados de bodegas y edificios industriales			
Estructuras especiales		Valor unitario	
Puentes			
Estaciones eléctricas			
Instalaciones de agua, gas, tuberías diversas, etc.			
Áreas diversas		Valor hectárea	
Jardines			
Calles, parqueaderos y áreas duras			
Bosques			
Áreas agrícolas			

Figura 7. Extracto del libro *Deslizamientos. Tomo I. Análisis Geotécnico*. Jaime Suárez. Análisis del riesgo con relación a propiedades (Bergren y otros, 1992).

- **Riesgo social en carreteras:** Un caso particular de riesgo social, es el riesgo en las carreteras y autopistas por acción de los deslizamientos. Este tipo de riesgo ha sido analizado en forma probabilística por varios autores, tanto para vehículos en movimiento como para peatones (Hungr y otros, 1999).

En particular, merece mencionarse el sistema de clasificación de amenazas para caídos de roca en el Estado de Oregón en EEUU (Pierson y otros, 1990). Este sistema emplea un procedimiento sencillo para estimar el riesgo de los caídos de roca en las carreteras utilizando un índice de riesgo AVR, el cual está dado por la expresión:

$$AVR = \frac{L_H \cdot V_H \cdot ADT}{PSL}$$

Donde:

AVR = Índice de riesgo (Vehículos en riesgo)

L_H = Longitud de la zona amenazada por los caídos de roca en Km.

V_H = Porcentaje de un vehículo que en cualquier momento se puede esperar que esté en la zona amenazada (Generalmente, se toma igual al 100%).

ADT = Promedio de tránsito diario.

PSL = Velocidad señalizada en Km/hora.

- **Riesgo económico:** El riesgo económico R_e es el valor de las pérdidas económicas después de la acción de un determinado deslizamiento. La evaluación del riesgo económico local y regional, puede realizarse en forma similar a como se evalúa la amenaza por los deslizamientos.

Para el riesgo económico local, el riesgo puede evaluarse de acuerdo con la expresión:

$$R_e = p(L_j) \cdot V_{ni} \cdot Q_n$$

$$p(l_1) = S_{ai} \cdot S_0^{-1} \cdot n_i \cdot T^{-1}$$

Donde:

V_{ni} = La vulnerabilidad de la facilidad a la acción del deslizamiento i .

Q_n = Costo total de la facilidad.

S_{ai} = Área promedio de destrucción por el deslizamiento i .

S_0 = Área total considerada

n_i = Número de deslizamiento i

T = Número de años durante los cuales se formaron los deslizamientos

$P(l_j)$ = Es la probabilidad de que se originen los deslizamientos i

5.3 FICHAS-INVENTARIO POR ÁREAS FUNCIONALES

Una vez se han generado los mapas anteriormente descritos y como parte del proyecto, se han incluido fichas de cada área funcional y municipio del THG, en las que se realiza un **análisis** que ha consistido en determinar **el riesgo de una forma cualitativa, en función de la proximidad de elementos expuestos a zonas con peligrosidad significativa.**

El objetivo de estas fichas es facilitar el acceso a los resultados del proyecto tanto a las administraciones como a particulares.

Las fichas recogen la evaluación de la peligrosidad y el análisis cualitativo del riesgo en el escenario climático 8.5 en zonas cercanas a elementos expuestos , en la proyección 2011-2040, por ser el futuro más próximo y por tanto gestionable, para las distintas administraciones interesadas en los resultados de este proyecto.

A tal respecto, es necesario definir con el fin de realizar un **correcto uso de los resultados obtenidos, las limitaciones tanto de la resolución de salida, por tanto de escala, como del método de trabajo aplicados a la generación de los mapas de susceptibilidad y peligrosidad frutos de este proyecto:**

- Se han realizado análisis de peligrosidad a partir de factores condicionantes, en mapas de resolución de 5x 5 m, mientras que los factores desencadenantes (resultados de KLIMATEK) se encuentran a una resolución de 1x1 km.
- En las fichas se definen las zonas urbanas y las infraestructuras que se encuentran más próximas a áreas de peligrosidad de moderada a muy alta. No se hace una valoración del riesgo *sensu stricto*, ya que ello implica tal y como se ha mencionado en apartados anteriores, la realización de un mapa de elementos expuestos (edificios de todo tipo y uso, tanto públicos como privados, así como de los las vías de transporte y sus elementos) y de vulnerabilidad, que abarque la totalidad del THG (apartados 5.2.3 y 5.2.4).

- Recordar que a la escala de trabajo y con los métodos usados, no es posible definir los volúmenes de material movilizados, la velocidad a la que podrían moverse estos volúmenes, ni la trayectoria que seguirían una vez movilizados.
- Tal y como se explica en los apartados 8.1.2 y 8.2.2 los resultados de los mapas de peligrosidad muestran resultados anómalos (muy altos), en las zonas de llanuras aluviales de los ríos más caudalosos (Oria, Deba, Urola y Urumea). Estos valores se han de descartar de los análisis de peligrosidad y riesgo en función de ubicación.

6. MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD Y PELIGROSIDAD. GENERACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA.

Una vez descritas las fases necesarias para llegar a definir el riesgo asociado, se realiza una descripción detallada del proceso de generación de cada mapa. Para ello, se vuelve a mostrar a continuación el gráfico en el que se representan de manera jerarquizada, el proceso de análisis necesario para definir el riesgo.

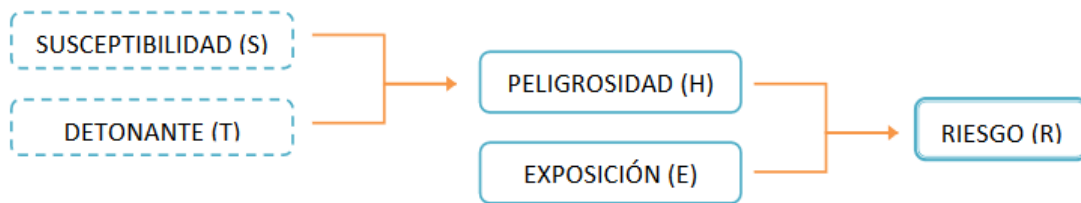


Figura 8. Esquema del proceso para la realización de los mapas de susceptibilidad, peligrosidad y riesgo.

La metodología de trabajo seguida, ha consistido en generar los mapas correspondientes a cada fase del análisis.

Hay que recordar, además, que se realiza en paralelo un análisis para cada tipo de deslizamiento, diferenciando entre inestabilidades de tipo masa y flujos. Los resultados del proceso, por tanto, serán dos mapas para cada fase.

7. MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD. DEFINICIÓN DE LOS FACTORES CONDICIONANTES.

Los **mapas de susceptibilidad** recogen la posibilidad de que en una zona se produzcan deslizamientos, dicho de otra forma, muestran si el terreno reúne los **factores condicionantes** para que se produzcan **inestabilidades**. Los factores condicionantes son aquellos intrínsecos al propio terreno, dependen de sus características y no de factores externos.

En el cuadro que se muestra a continuación, se definen los factores condicionantes de deslizamientos tanto en masa como de tipo flujos de tierra y barro, y la forma en la que se han integrado en el análisis de susceptibilidad.

	Factores	Influencias y efectos	Factor ponderación incluido en el análisis susceptibilidad
Condicionantes	Relieve	Distribución de esfuerzos	Pendiente (M) (D/F)
		Estado tensional	RTP. Posición topográfica relativa (M) (D/F)
		Presiones de agua	Distancia red de drenaje (M) (D/F)
		Acumulación de agua	Curvatura estándar (D/F)
	Litología (composición, textura).	Densidad, resistencia. Comportamiento hidrogeológico	Litologías diversas. Incluido en el Factor GSI (M) (D/F)
	Estructura geológica	Zonas de debilidad del terreno por procesos de fracturación. Zonas de debilidad	Zonas de fallas regionales, a escala 1/25000. Incluido en el Factor GSI
	Propiedades geomecánicas de los materiales	Hace referencia a la “resistencia” de los materiales. Combina litología, meteorización y fracturación.	GSI. Índice geológico de resistencia. (M) (D/F)
	Deforestación	Erosión, efecto de la cobertura vegetal frente a erosión	Usos del suelo (M) (D/F)
Meteorización	Cambio físicos y químicos, erosión externa e interna, generación de zonas de debilidad	Incluido dentro del GSI. Índice geológico de resistencia. (M) (D/F)	

Cuadro 3. Exposición de factores desencadenantes, descripción y observaciones sobre los mismos. (M). Incluido en análisis susceptibilidad deslizamientos en masa.(D/F). Incluido en análisis susceptibilidad inestabilidades tipo debris/flujos.

Los factores condicionantes se incluyen en el análisis de susceptibilidad en forma de mapas. El origen de los datos, a partir de los cuales se han generado los mapas de factores condicionantes es diverso, con el objetivo de recoger de una forma resumida la procedencia de estos datos se muestra el siguiente cuadro:

TIPO DE MAPA	FACTOR CONDICIONANTE	PROCEDENCIA DATO
MAPAS DERIVADOS	PENDIENTE RTP DISTANCIA RED DE DRENAJE CURVATURA ESTANDAR	MDT. Modelo Digital del Terreno. GEOEUSKADI
MAPAS TEMÁTICOS	GSI REAL	CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA (LITOLOGÍA Y TECTÓNICA). GEOEUSKADI
	USOS DEL SUELO	MAPA TEMÁTICO USOS SUELO. GEOEUSKADI

Cuadro 4. Resumen tipo de mapas de factores condicionantes y procedencia del dato.

De los datos de partida recopilados tiene especial importancia el MDT (modelo digital del terreno), el cual aporta información del relieve de gran calidad, y de la que es posible extraer multitud de información derivada, tales como el mapa de pendientes, el RTP (posición topográfica relativa), curvatura estándar...

Se han usado, además, otros tipos de datos representados en mapas temáticos, como cartografías geológicas y mapas de usos del suelo.

Como conclusión cabe señalar que tanto los datos procedentes de MDT como de cartografía temática poseen las siguientes características:

- Datos abundantes.
- Son de gran calidad.
- Bien distribuidos y por tanto de gran representatividad.

Estas características, los hacen ser datos de partida sólidos para definir los factores condicionantes de los procesos de inestabilidad analizados.

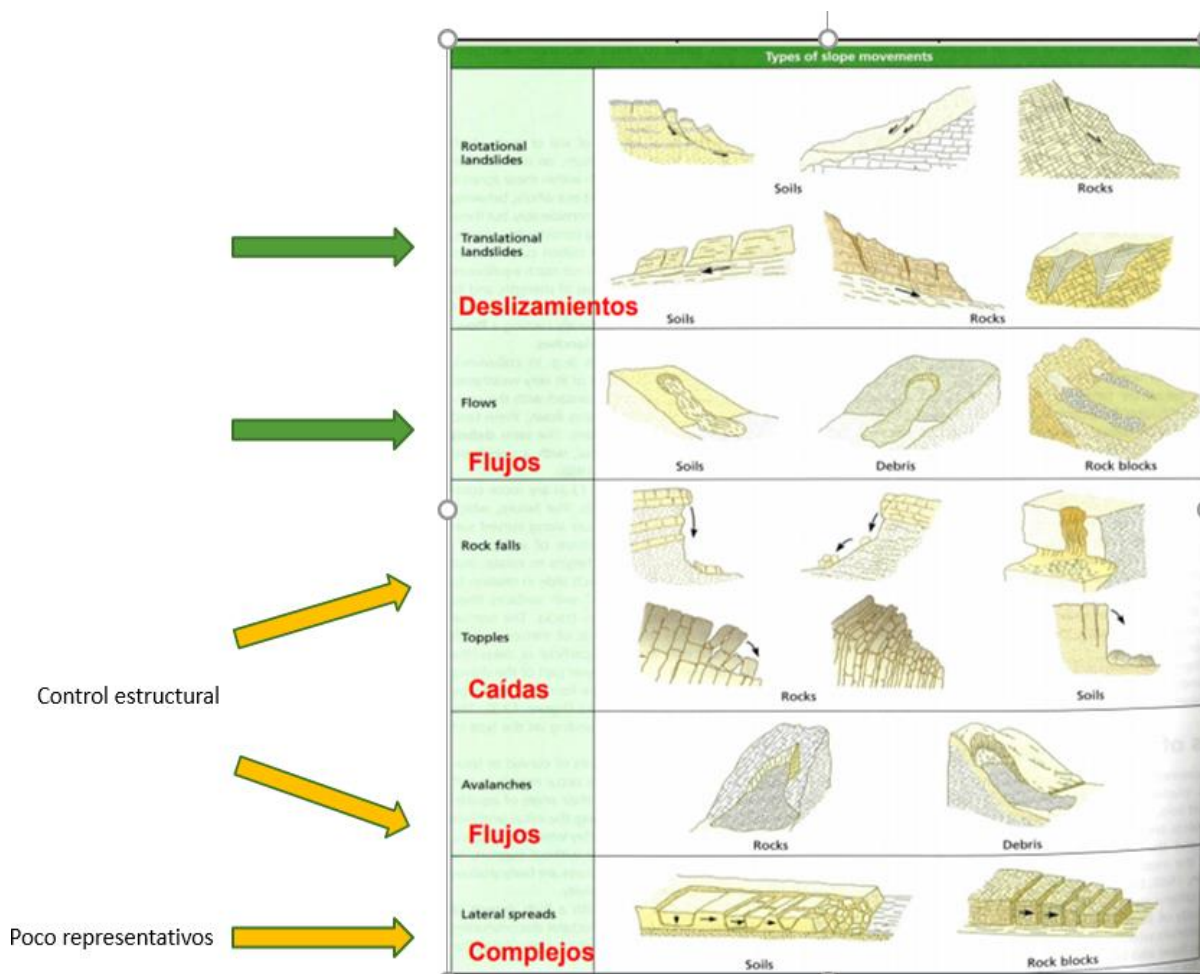
7.1 TIPOLOGÍA DE LA INESTABILIDADES ANALIZADAS.

Los deslizamientos son movimientos de masas de rocas o tierras hacia abajo de un talud o ladera. Se incluyen tanto procesos de denudación como erosivos. La naturaleza exacta del proceso no se incluye en su definición, estos procesos son la consecuencia de la acción de fuerzas gravitacionales, hidráulicas, sismos...

Los deslizamientos en laderas naturales pueden ser profundos y movilizar millones de metros cúbicos de material. Los mecanismos de rotura suelen ser complejos, estando condicionados por factores o procesos de escala geológica (fallas, procesos tectónicos, procesos geomorfológicos, flujos de agua subterránea...).

Las inestabilidades en las laderas se deben a desequilibrios entre las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno, de tal forma que las fuerzas desestabilizadoras superan a las estabilizadoras o resistentes.

Los deslizamientos se clasifican generalmente por el tipo de material al que afecta (sustrato rocoso, derrubios, suelos), y por el mecanismo de rotura. Se muestra a continuación una clasificación de los distintos tipos de movimientos:



Cuadro 5. Tipos de deslizamientos.

Se ha considerado que los deslizamientos en **masa en suelos y los flujos en tierra y barros** (señalados con flecha verde) son los tipos de inestabilidad que **deben analizarse en los mapas de susceptibilidad a generar**, puesto que los factores dominantes del proceso son bien conocidos y pueden ser representados en mapas a la escala del análisis a realizar, esos tipos de deslizamientos además son los que se dan con mayor frecuencia en el THG.

Los que se han señalado en amarillo tales como las caídas y los derrubios de roca, no se han analizado en el presente estudio, dado el alto control estructural del proceso, la falta de datos a nivel regional y la escala del mismo.

Por motivos distintos no se han tenido en cuenta los llamados complejos, y es que su representatividad en el THG es muy baja o inexistente.

A continuación, se muestra las tipologías de deslizamientos a analizar, sus principales características y los factores condicionantes del proceso:

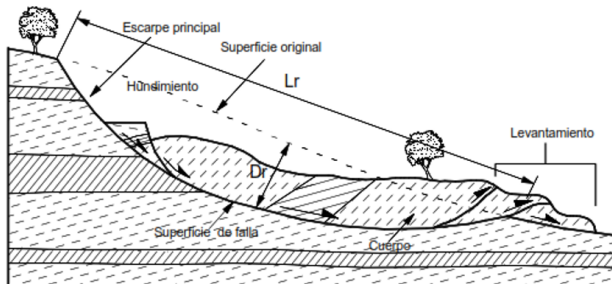
7.1.1 DESLIZAMIENTOS EN MASA

Son **movimientos de masas** de suelos, que se deslizan sobre una o varias superficies de **rotura netas** al superarse la **resistencia al corte** de las mismas.

El mecanismo de generación y funcionamiento de un deslizamiento en masa, se puede modelizar a partir de un análisis físico-matemático, en el cual intervienen fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras. Los factores condicionantes que se incluyen en el análisis de susceptibilidad intentan reproducir el modelo físico con el que se simulan las fuerzas que actúan en un deslizamiento.

Los deslizamientos en masa se producen por una **resolución o evolución de un estado tensional que se produce en el terreno**. En resumen, una masa de suelo que presenta unas características mecánicas o resistentes (factor GSI Índice de Calidad geológica) se ve sometida a un estado tensional resultado de su localización dentro de una ladera (factor RTP) y de la pendiente de la misma (factor Pendiente). En función de la relación entre la resistencia del suelo y las solicitaciones tensionales la zona será más propensa o no a que se generen deslizamientos.

Deslizamientos en masa. (tensodeformacional)



Factores condicionantes:

- Pendiente
- GSI. Calidad de los materiales
- Posición topográfica relativa
- Cercanía a vaguada
- Usos del suelo

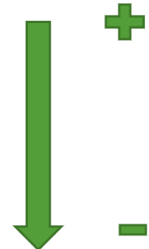


Figura 9. Geometría general de un deslizamiento en masa y listado de factores condicionantes en función de su peso en la generación de deslizamientos.

De mayor a menor relevancia en el comportamiento de los deslizamientos en masa se han seleccionado los siguientes factores condicionantes:

- Pendiente del terreno. La descomposición del peso de la masa (en fuerza estabilizadora y desestabilizadora) da lugar a un aumento de las fuerzas desestabilizadoras al aumentar la pendiente.
- Calidad de los materiales. Representado en el GSI, el cual se definirá más adelante.
- Posición topográfica relativa. Los deslizamientos en masa de grandes dimensiones se producen en muchas ocasiones por movimientos gravitacionales. Serían valles con una importante diferencia de cota entre las cimas y el fondo de valle, lo cual genera una sobrecarga de estas zonas.
- Cercanía a vaguada o distancia a la red de drenaje. Las zonas cercanas a vaguadas suelen presentar acumulaciones de suelos tanto de tipo coluvial como eluvial y representan además zonas con mayor probabilidad de ser afectadas por aumentos del nivel freático, lo cual genera presión en los poros del material y por tanto aumento de las fuerzas desestabilizadoras.
- Usos del suelo. La existencia o no de cubierta vegetal y el tipo, pueden dar lugar a una mayor infiltración o escorrentía superficial.

7.1.2 FLUJOS DE TIERRA Y BARRO

Los flujos son **movimientos de masas de suelos con abundante presencia de agua**, donde el **material está disgregado y se comporta como un fluido**, sufriendo una deformación continua, sin presentar superficies de rotura definidas.

Las deformaciones relativas internas son muy grandes y fluyen de forma similar a un líquido viscoso. El flujo puede ser laminar o turbulento. Al aumentar la densidad y viscosidad puede transportar grandes bloques.

El agua es el principal agente desencadenante de estos movimientos, por la **perdida de resistencia** que da lugar. Se dan por tanto en **situaciones de estrés hidráulico**.

A los flujos en los que existe menos del 50% de finos se les denomina flujo de detritos, mientras que a los que contienen mas de 50% de finos se les denomina flujos de suelo o tierra. Un tipo especial de este último es el llamado flujo de lodo, en los que todo el material es de tipo fino. Alcanzan altas velocidades y tienen un gran poder destructor.

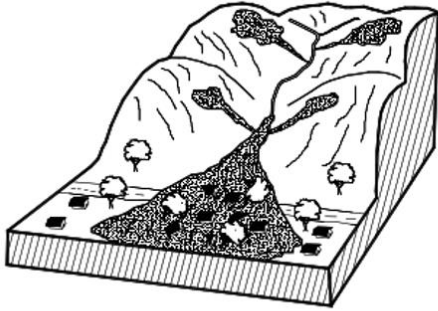
El origen de muchos de estos movimientos, son deslizamientos rotacionales o traslacionales que al acumular material suelto en el pie dan lugar a flujos. Es además común que lleguen a zonas de vaguada y canales, moviéndose a lo largo de los mismos.

El **análisis del comportamiento de los flujos** se estudia a partir de **mecánica de los fluidos**, en los que tiene especial importancia la pendiente del terreno, el tipo de material del que se compone el flujo y la cantidad de agua que contiene, lo cual determina la viscosidad del flujo.

En definitiva, en los **deslizamientos tipo flujo**, el proceso natural hace referencia a **la generación de esfuerzos de tipo hidráulico sobre un tipo determinado de material**. Así en estos casos cobra importancia la forma de discurrir la escorrentía superficial (Factor Curvatura del terreno) y la proximidad a zonas de cauce (Factor Distancia al cauce). Otro factor que interviene es la presencia de masa forestal o cultivos en la zona (Factor usos del Suelo).

A continuación, se muestra una figura en la que se observa la generación y el desplazamiento que suele ocurrir en los flujos de tierra. Se generan en las laderas colindantes a zonas de vaguada y terminan circulando por estas.

Flujos (estres hidráulico)



Factores condicionantes:

- Pendiente
- Curvatura estándar
- GSI real
- Distancia red drenaje y usos suelo
- Posición topográfica relativa



Figura 10. Geometría general de un flujo y listado de factores condicionantes en función de su peso en la generación de deslizamientos.

Se han seleccionado de más a menos peso en la susceptibilidad de flujos, los siguientes factores condicionantes:

- Pendiente del terreno. Factor condicionante debido a que desencadena la inestabilidad y además es necesaria para que se continúe el movimiento del flujo y que no disipe la energía.
- Curvatura estándar. Es la capacidad de una determinada zona del terreno de concentrar los flujos que le llegan. Tal y como se ha mencionado el agua es un factor desencadenante, la curvatura estándar por el contrario pretende modelizar la capacidad de concentración de flujos y la consiguiente pérdida de resistencia que genera en los materiales.
- Calidad de los materiales. Representado en el GSI (Global strenght Index) el cual se definirá más adelante.
- Cercanía a vaguada. Las zonas cercanas a vaguadas suelen presentar acumulaciones de suelos tanto de tipo coluvial como eluvial y representan además zonas con mayor probabilidad de ser afectadas por aumentos del nivel freático, lo cual genera presión en los poros del material y por tanto aumento de las fuerzas desestabilizadoras.

- Usos del suelo. La existencia o no de cubierta vegetal y el tipo, pueden dar lugar a una mayor infiltración o escorrentía superficial.
- Posición topográfica relativa. En este tipo de deslizamientos se tiene en cuenta para determinar geomorfológicamente su posición, las zonas de vaguada y valles tienen más probabilidad de ser afectadas por estas inestabilidades que una cima o una ladera en la que no se concentren los flujos.

7.2 MÉTODO PARA LA GENERACIÓN DE LOS MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD

Se han descrito hasta ahora los factores que determinan la susceptibilidad del terreno, procede en este momento, definir cómo se van a integrar en una función para obtener la susceptibilidad de un área determinada.

En la ecuación, se realiza un análisis que incluye una componente basada en la experiencia y conocimiento de los factores que gobiernan los deslizamientos, y una componente basada en la estadística, a través de la probabilidad de ocurrencia de cada clase dentro de cada factor.

En la siguiente imagen, se plasma de forma esquemática el proceso para definir la susceptibilidad. Cada factor condicionante tiene un peso diferente en la ecuación, a su vez cada factor se divide en clases con una probabilidad distinta ante deslizamientos, esta estructura genera una suma ponderada de factores.

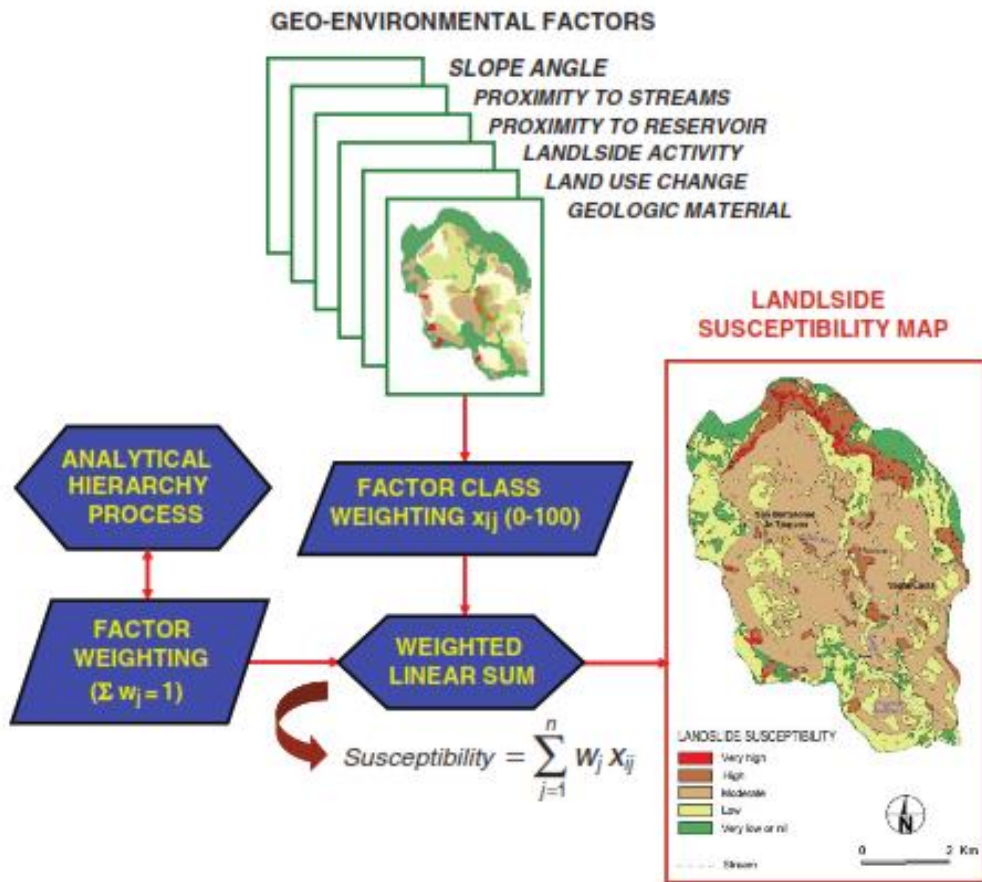


Figura 11. Diagrama del proceso de generación de mapas de susceptibilidad aplicando método jerárquico analítico. Imagen extraída del capítulo Inventories, Susceptibility, Hazards and Risk, escrito por Javier Hervás y Peter Bobrowsky del libro Landslide. Disaster Risk Reduction.

A continuación, se puede ver de forma esquemática la estructura de la herramienta de análisis:

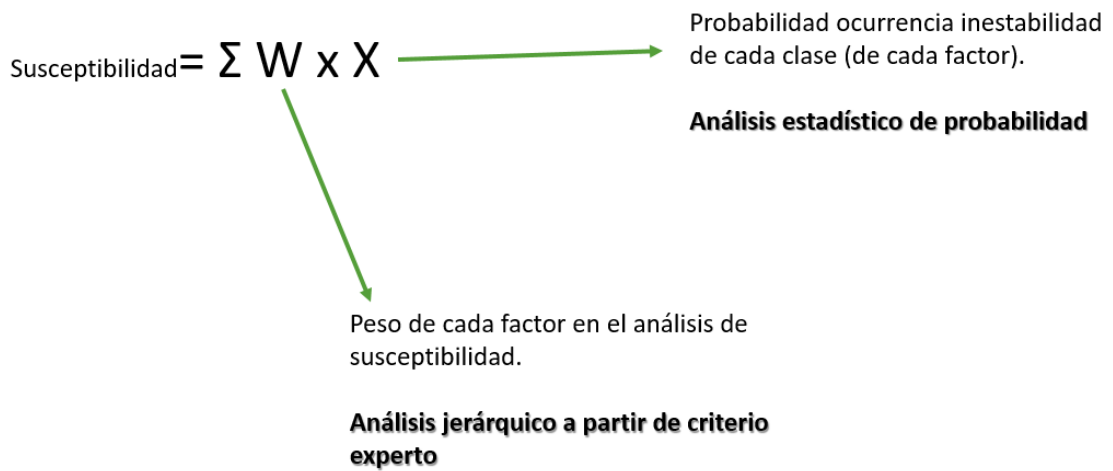


Figura 12. Esquema del análisis de susceptibilidad.

7.3 PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA. PONDERACIÓN DE FACTORES

Tal y como se acaba de comentar, cada factor condicionante tendrá un peso distinto en la ecuación, el cual, se calcula mediante una técnica denominada Proceso de Jerarquía Analítica, conocida comúnmente por sus siglas en inglés **AHP** (Analytic Hierarchy Process).

El uso de esta técnica, se justifica en la eficacia de la misma a la hora de definir pesos para un conjunto de factores, en los que se hace complicado, decidir sin una herramienta estadística los porcentajes correspondientes a cada uno.

La AHP desarrollada por Thomas Satty en 1980, se define como una técnica multiatributos que divide un problema complejo en jerarquías, donde cada nivel es descompuesto en elementos específicos. AHP analiza los factores que intervienen en el proceso de decisiones sin requerir que estos se encuentren en una escala que les sea común.

Los niveles de importancia o ponderación de los factores en este caso, se estiman por medio de comparaciones apareadas entre estos. La comparación se realiza tomando como base una escala, la cual se muestra a continuación:

Importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos elementos contribuyen idénticamente al objetivo.
3	Dominancia débil	La experiencia manifiesta que existe una débil dominancia de un elemento sobre otro.
5	Fuerte dominancia	La experiencia manifiesta una fuerte dominancia de un elemento sobre otro.
7	Demostrada dominancia	La dominancia de un elemento sobre otro es completamente demostrada.
9	Absoluta dominancia	Las evidencias demuestran que un elemento es absolutamente dominado por otro.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Son valores intermedios de decisión.

Cuadro 6. Valoración por pares.

La comparación se realiza en pares, los cuales se colocan en forma de matriz. La comparación apareada del elemento i con el j es colocada en la posición a_{ij} de la matriz A , los valores recíprocos de estas comparaciones son colocados en la posición a_{ji} de A , con el objetivo de preservar la consistencia del juicio.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdot & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdot & a_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdot & a_{nn} \end{bmatrix}$$

AHP permite identificar las inconsistencias de las valoraciones realizadas, ya que se incorpora en el análisis un **Índice de Consistencia (IC)** y una **Relación de Consistencia (RC)**, para medir la calidad de las valoraciones realizadas.

$$IC = \frac{\lambda_{MAX} - n}{n - 1}$$

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

Se considera que un **RC <0,1** es aceptable. En el caso de que fuese mayor sería necesario volver a hacer las valoraciones nuevamente.

El RC es una medida de la relación del error cometido por la valoración realizada y el error aleatorio. Este debe ser menor del 0,1 o 10%

IA representa un índice aleatorio, que se genera a partir de un promedio de IC de 500 matrices aleatorias recíprocas positivas.

7.3.1 RESULTADOS DEL AHP

Tal y como se ha explicado en apartados anteriores, se ha estudiado de forma paralela pero diferenciada, la susceptibilidad para deslizamientos en masa y para inestabilidades tipo flujos, por lo que el análisis jerárquico se plantea para cada tipo de inestabilidad.

A continuación, se muestran los resultados del análisis jerárquico realizado para cada tipo de deslizamiento.

Deslizamientos en masa. Ponderación de factores condicionantes.

En los deslizamientos en masa, los factores condicionantes seleccionados para determinar la susceptibilidad son los siguientes (ordenados de mayor a menor peso):

- Pendiente.
- GSI real. Calidad de los materiales.
- Posición topográfica relativa.
- Cercanía a vaguada.
- Usos del suelo.

Se muestra a continuación el extracto de la tabla de cálculo en la que se ha realizado el AHP.

		AXP										
		1,52 CI=NMAX-N/N-1					0,12					
		2,77 RI=1,98(N-2)/N					1,188					
		0,68 CR=CI/RI					0,10 < 0,1					
		0,31										
TIPO DE INESTABILIDAD		0,21										
DESPLAZAMIENTO EN MASA		5,49										
		GSI	pendiente	relieve relativo	cercanía a vaguada	usos del suelo	GSI	pendiente	relieve relativo	cercanía a vaguada	usos del suelo	
LITOLOGÍA	GSI	1,00	0,33	2,00	8,00	9,00	0,21	0,19	0,23	0,38	0,38	0,28
MDT	Pendiente	3,00	1,00	5,00	8,00	9,00	0,63	0,57	0,57	0,38	0,38	0,50
	RTP	0,50	0,20	1,00	4,00	2,00	0,11	0,11	0,11	0,19	0,08	0,12
	Cercanía a vaguada	0,13	0,13	0,25	1,00	3,00	0,03	0,07	0,03	0,05	0,13	0,06
USOS	Usos del suelo	0,11	0,11	0,50	0,33	1,00	0,02	0,06	0,06	0,02	0,04	0,04
		4,74	1,77	8,75	21,33	24,00						1,00

De los resultados de desprenden los siguientes valores de ponderación para los factores condicionantes:

Factor condicionante	Peso
Pendiente	0,5
GSI real	0,28
Posición topográfica relativa RTP	0,12
Distancia a la red de drenaje	0,06
Usos del suelo	0,04

Los resultados del AHP corresponden con lo esperado y se comprueba que son coherentes, ya que el valor de la relación de consistencia es inferior o igual a 0,1

Flujos. Ponderación de factores condicionantes.

En los flujos, los factores condicionantes seleccionados para determinar la susceptibilidad son los siguientes (ordenados de mayor a menor peso):

- Pendiente.
- Curvatura estándar.
- GSI real. Calidad de los materiales.
- Distancia a la red de drenaje y usos del suelo.

- Posición topográfica relativa.

Se muestra a continuación el extracto de la tabla de cálculo en la que se ha realizado el AHP.

		AXP													
		0,85	CI=NMAX-N/N-1			0,15									
		2,42	RI=1,98(N-2)/N			1,584									
		0,26	CR=CI/RI			0,09		$\leq 0,1$							
TIPO DE INESTABILIDAD		0,58													
FLUJOS		1,78													
		0,85													
		6,74													
		GSI	pendiente	relieve rela	cercania a v	Curvat stad	usos del sue	GSI	pendiente	relieve relativ	cercania a vaguada	Curvatura std	usos del suelo		
LITOLOGÍA	GSI	1,00	0,25	3,00	3,00	0,50	1,00	0,12	0,10	0,14	0,23	0,12	0,08	0,13	
MDT	Pendiente	4,00	1,00	7,00	2,00	2,00	6,00	0,46	0,39	0,32	0,15	0,48	0,48	0,38	
	RTP	0,33	0,14	1,00	0,33	0,17	0,50	0,04	0,06	0,05	0,03	0,04	0,04	0,04	
	Cercania a vaguada	0,33	0,50	3,00	1,00	0,17	1,00	0,04	0,20	0,14	0,08	0,04	0,08	0,09	
	Curvatura std	2,00	0,50	6,00	6,00	1,00	3,00	0,23	0,20	0,27	0,45	0,24	0,24	0,27	
USOS	Usos del suelo	1,00	0,17	2,00	1,00	0,33	1,00	0,12	0,07	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	
		8,67	2,56	22,00	13,33	4,17	12,50								

De los resultados de desprenden los siguientes valores de ponderación para los factores condicionantes:

Factor condicionante	Peso
Pendiente	0,38
Curvatura estándar	0,27
GSI real	0,13
Distancia a la red de drenaje	0,09
Usos del suelo	0,08
Relieve topográfico relativo	0,04

Los resultados del AHP corresponden con lo esperado y se comprueba que son coherentes, ya que el valor de la **relación de consistencia es inferior a 0,1**.

7.4 PROBABILIDAD POR CLASES. MAPAS DERIVADOS Y TEMÁTICOS DE FACTORES CONDICIONANTES.

7.4.1 PROBABILIDAD POR CLASES

Una vez definidos los pesos de cada factor condicionante, es necesario determinar las **probabilidades de ocurrencia de deslizamiento en cada clase (rango de datos) de cada factor.**

Inicialmente se pretendía determinar estas probabilidades a partir del análisis estadístico de un inventario de deslizamientos, el cual se crearía recopilando la información existente en las distintas administraciones (Diputación Foral de Gipuzkoa y BIDEGI) que cuentan con datos a este respecto.

De la realización de esta tarea se ha conseguido inventariar alrededor de 300 deslizamientos, entre los que se encuentran varias tipologías (deslizamientos en masa, flujos, caídas de bloques, cuñas...) de distinta entidad. Estos se sitúan en su mayoría cerca de las vías de comunicación principal, y en muchos de los casos su génesis se asocia a la ejecución de la misma. Los datos, se encuentran concentrados y, por lo tanto, poco repartidos en el territorio.

Inicialmente, como se ha comentado, se pretendía realizar un modelo de riesgo básicamente estadístico, pero debido a los condicionantes existentes en cuanto a calidad, representatividad y cantidad del inventario, se ha optado por generar un modelo en el que el inventario, sea usado como contraste de los resultados obtenidos mediante la metodología aplicada.

Una vez reconducidos los objetivos iniciales, hacia un análisis acorde con los datos reales, se ha optado por definir las probabilidades de cada clase a partir de las tesis doctorales realizadas en el THG, en las que se analizaba la peligrosidad ante deslizamientos en la Comarca del Bajo Deba y en la Cuenca del río Oria. Ambas se han usado como punto de partida y contraste de resultados.

Igualmente se ha contado con los datos aportados por la bibliografía consultada sobre deslizamientos (la cual se recoge en el apartado del mismo nombre de este documento), en la que se definen y analizan los factores condicionantes, describiéndose para cada uno de ellos las situaciones en las que se generan los deslizamientos (pendientes optimas, tipo de suelos a los que afecta..)

En la tabla que se muestra a continuación se realiza un resumen de la información específica obtenida para el THG, tanto de estudios previos como de inventarios existentes en la administración:

ORIGEN INFORMACIÓN	PROYECTO Y AUTOR	ZONA ESTUDIO
TESIS DOCTORAL	Methodological approach for landslide analysis in a regional scale. Txomin Bornaetxea Estela	Cuenca río Oria
TESIS DOCTORAL	Elaboración y validación de mapas de susceptibilidad mediante técnicas de análisis espacial. Juan Remondo Tejerina	Bajo Deba
BIDEGI	Base de datos de BIDEGI.	THG
Departamento de Obras y Servicios. Diputación Foral Gipuzkoa	Base de datos del departamento	THG
Departamento de medio Ambiente y Obras Hidráulicas. Diputación Foral Gipuzkoa	ESTUDIO DE RIESGOS NATURALES DE LA PROVINCIA DE GIPUZKOA. INGEMISA	THG
UNIVERSIDAD DE GRANADA. ESPAÑA TESIS DOCTORAL	Análisis de la peligrosidad frente a los movimientos de ladera en la cuenca de Loja (Ecuador). John Egverto Soto Luzuriaga	Cuenca de Loja (Ecuador)

Cuadro 7. Datos principales de análisis del proyecto.

7.4.2 MAPAS DERIVADOS.

Tal y como se ha comentado en apartados anteriores, parte de los factores condicionantes proceden de los datos aportados por el MDT (Modelo Digital del Terreno) con los que se han generado mapas derivados. En estos mapas se han representado características intrínsecas del terreno fuertemente ligadas a la susceptibilidad, tales como la pendiente, la distancia a la red de drenaje, el relieve topográfico relativo...etc.

Se han utilizado también mapas temáticos, que en este caso corresponden a usos del suelo y litologías (tratadas en este caso a partir del índice GSI).

A continuación, se muestran los resultados obtenidos y se desarrollan los datos más significativos del proceso de creación de los mismos.

7.4.2.1 Mapa de pendientes

La pendiente, es el gradiente de inclinación de la línea de máxima pendiente tangente al terreno en un punto respecto a la horizontal. Normalmente se expresa en grados o en porcentaje.

A partir del MDT se ha elaborado un mapa de pendientes, el cual se ha reclasificado en rangos de valores, usándose en este caso los mismos pesos de clases para los deslizamientos en masa y para los flujos, ya que, tal y como se ha mencionado, muchos flujos se inician como un deslizamiento en masa.

PENDIENTE CLASES (º)		PORCENTAJE ESTIMADO ÁREA INESTABLE (%)
1	0-5	4,5
2	5-10	9,5
3	10-20	30
4	20-35	50
5	35-60	5,5
6	>60	0,5

El mapa de pendientes se ha reclasificado en 6 clases para su tratamiento en el modelo, a cada clase se le ha dado un peso, expresado en porcentaje de área inestable en cada rango de valores.

Este peso se ha estimado a partir de estudios previos y del conocimiento físico de los tipos proceso de inestabilidad analizado.

La bibliografía, recoge que los deslizamientos en masa se dan en un rango de pendientes entre los 10º y algo más de 35º, esto se debe a que para que se produzca un deslizamiento, la pendiente debe ser mayor que el ángulo de rozamiento interno del material, el cual oscila entre los 14º y los 35º en general.

Por encima de los 40º apenas se dan deslizamientos en masa debido a que a partir de estas pendientes no se generan acumulaciones de suelos, o estos son de escasa entidad.

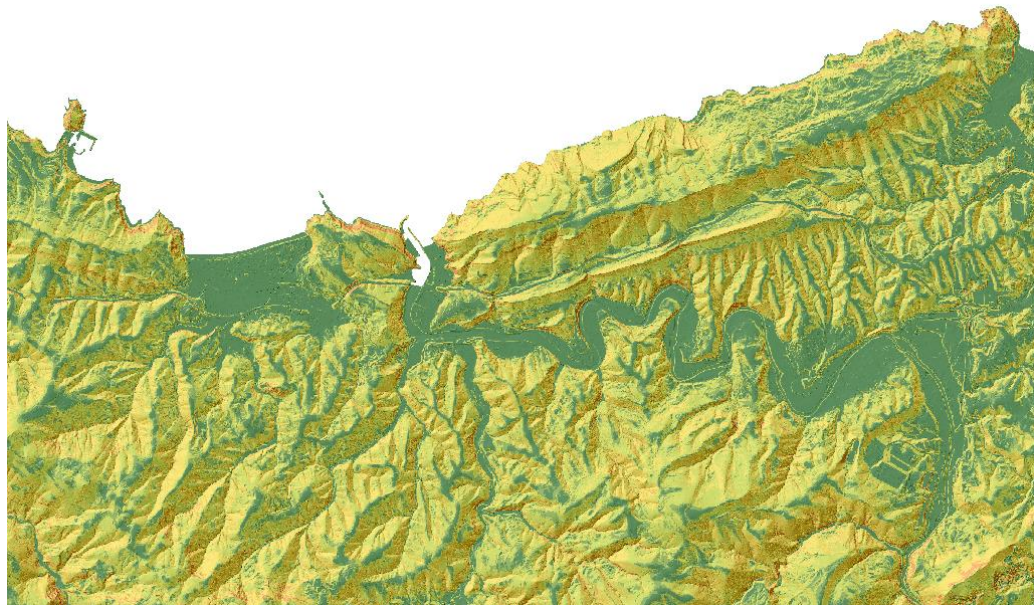


Figura 12. Detalle del mapa de pendientes en la zona de Getaria a Donostia. Se observa el tramo final del Oria y el arenal de Zarautz en color verde (pendientes menores de 10º).

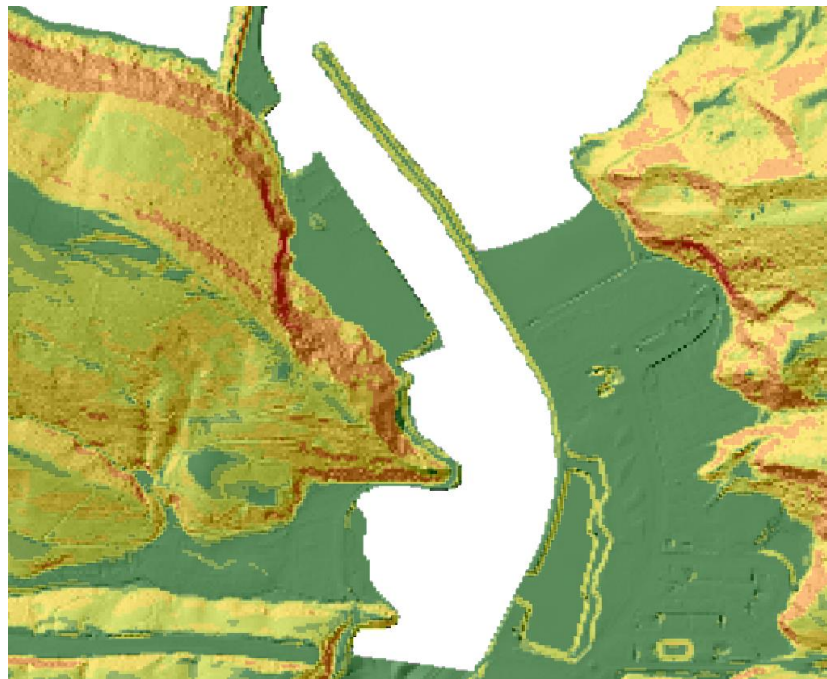


Figura 13. En la imagen se observan con mayor detalle los acantilados de Orio, los cuales aparecen en rojo (>60°).

7.4.2.2 RTP (Relative Topographic Position)

La posición topográfica relativa representa la relación de una determinada zona (pixel) con las que se sitúan a su alrededor (vecinas), esto permite caracterizar las formas locales en relación con el contexto espacial. La importancia de este factor se basa en la capacidad de definir la posición de un determinado punto respecto a los de su entorno, por ejemplo, de cimas y crestas, cañones, valles amplios, medias laderas... Esta posición ayuda a definir si en un determinado punto existen sobrecargas.

Cabe recordar que los grandes deslizamientos que se han producido en Gipuzkoa han sido de tipo gravitacional. Este tipo de deslizamientos se dan en laderas con diferencias de cotas importantes entre cima y fondo de valle, donde los materiales existentes en los puntos bajos pueden verse afectados por una sobrecarga.

Los resultados del RTP dan valores entre -1 y +1, los valores negativos, cercanos a -1, corresponderían a fondos de valles, mientras que en las cimas se dan los valores cercanos a +1.

En la imagen inferior se representa a modo de croquis, la comparación de un pixel con los de su entorno y los valores resultantes.

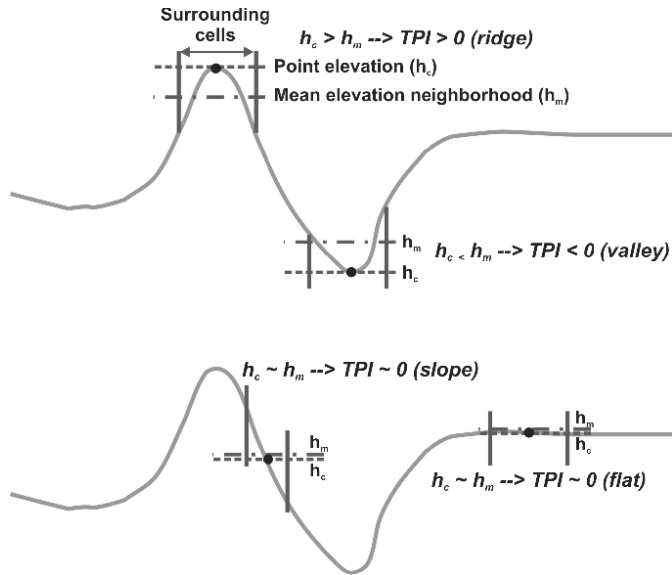


Figura x. Ejemplo en el que se ilustra a partir de distintas geoformas el resultado del RTP.

La imagen inferior es un extracto del mapa de RTP, los resultados muestran como las zonas donde la celda o pixel presenta valores aproximados a las de su entorno da como resultado datos próximos a cero, es el caso de crestas y cimas anchas, y de llanuras. Las medias laderas se marcan en amarillos y naranjas, y los fondos de valle en color verde, datos muy próximos a -1.

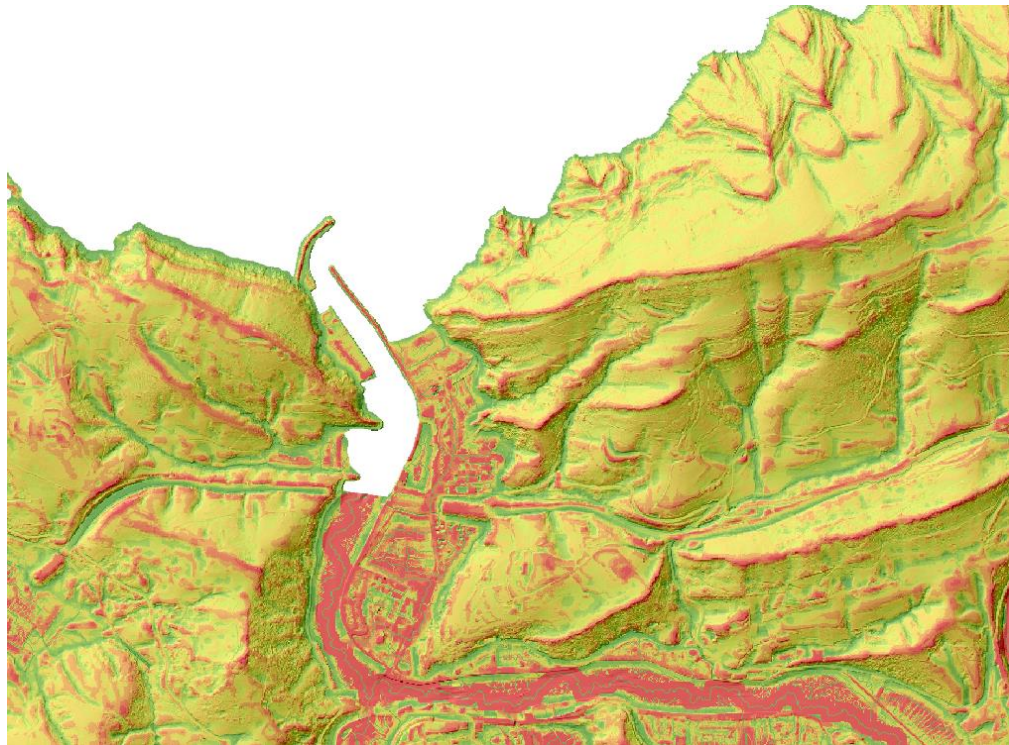


Figura 14. En la imagen se puede observar cómo se marcan las zonas de crestas y los valles amplios con el mismo valor de RTP. Las medias laderas y los valles encajados se diferencian en el rango de color, con amarillos naranjas medias laderas y con verdes los fondos de valle.

Para cada tipo de deslizamiento se han dado distintos pesos a cada clase, intentando reproducir de esta forma el modelo geomecánico:

FLUJOS

Los mayores porcentajes de probabilidad se concentran en las zonas de vaguadas, correspondientes a arroyos de 1^{er} y 2^o orden. Son zonas que suelen coincidir con acumulaciones de suelos y derrubios importantes, en las que normalmente no se concentra gran cantidad de agua en periodos de lluvias normales, pero si en eventos de fuerte intensidad.

RTP CLASES		PORCENTAJE ESTIMADO ÁREA INESTABLE (%)
1	-1,00 a -0,75	15
2	-0,75 a -0,50	15
3	-0,50 a -0,25	15
4	-0,25 a 0	25
5	0 a 0,25	18
6	0,25 a 0,50	7
7	0,50 a 0,75	2,5
8	0,75 a 1,00	2,5

MASAS

Los valores de probabilidad de ocurrencia, son mayores al igual que en los flujos, en las zonas de laderas y cercanas a vaguadas, sólo que en este caso se concentran más en el entorno de las medias laderas.

RTP CLASES		PORCENTAJE ESTIMADO ÁREA INESTABLE (%)
1	-1,00 a -0,75	0
2	-0,75 a -0,50	5
3	-0,50 a -0,25	15
4	-0,25 a 0	35
5	0 a 0,25	25
6	0,25 a 0,50	15
7	0,50 a 0,75	5
8	0,75 a 1,00	0

7.4.2.3 Mapa de distancia a la red de drenaje

Se ha realizado un mapa de distancia a la red de drenaje a partir de un proceso denominado de *buffering*, determinándose una entidad alrededor de la cual se van realizando zonaciones a distintas distancias. Con ello se definen zonas de influencia de la red de drenaje que pueden dar lugar a inestabilidades en las laderas.

Se han establecido los siguientes rangos y peso a cada clase en función de los tipos de deslizamientos analizados:

FLUJOS

CLASES	DISTANCIA RED DRENAJE (m)	PORCENTAJE %
1	0-50	70
2	50-100	7,5
3	100-200	7,5
4	200-500	7,5
5	>500	7,5

Como puede verse en la tabla, se ha asignado el valor más alto de probabilidad a la clase 1, las más cercana a los cauces, el sentido físico de esta valoración se basa en que la generación de flujos está fuertemente ligada a procesos de escorrentías superficiales altas, las cuales, tienen mayor probabilidad de ocurrir en zonas cercanas a vaguadas, donde se terminan concentrando los flujos.

MASAS

CLASES	DISTANCIA RED DRENAJE (m)	PORCENTAJE %
1	0-50	30
2	50-100	25
3	100-200	25
4	200-500	15
5	>500	5

Para los deslizamientos en masa la probabilidad de ocurrencia se encuentra mas repartida en distintas clases, las mayores probabilidades se dan hasta los 200 m de distancia a cauce, ocurre algo parecido a los flujos, sólo que, en el caso de los deslizamientos en masa, son los acumulados de lluvia los que desencadenan el proceso, y que hacen elevarse el nivel freático, el cual tiene una mayor distancia de afección.

7.4.2.4 Mapa de curvatura estándar

Se ha realizado un mapa de curvatura, en el que se expresa la forma cóncava, plana o convexa del terreno. La curvatura se obtiene calculando la derivada segunda de la superficie. Los valores positivos describen la curvatura convexa, los negativos la cóncava. Los valores cercanos a cero corresponden a zonas planas.

El mapa de curvatura se usa para definir los procesos de erosión y escorrentía. Las zonas cóncavas poseen una mayor potencialidad de sufrir deslizamientos, sobre todo de tipo flujo.

Existen tres tipos de curvatura, la de perfil, la plana y la estándar que combina las dos anteriores.

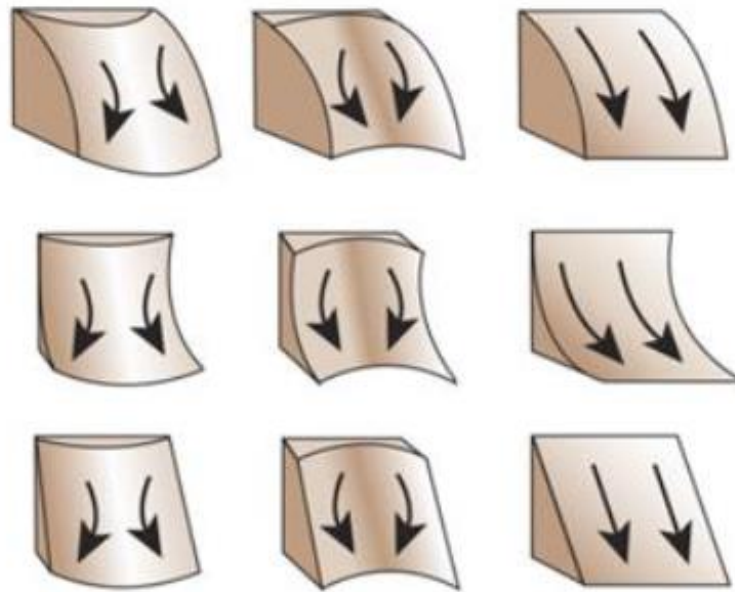


Figura 15. Tipos de curvatura mixta. Imagen extraída de tesis doctoral de John Egvertto Soto Luzuriaga.

La curvatura estándar indica la concentración de flujos superficiales en una celda. En las cóncavas se concentran, mientras que en las convexas se dispersan.

Las celdas con curvatura cóncava, las cuales concentran los flujos, tendrían más probabilidad de sufrir un aumento de la presión de poros, lo cual induce procesos de inestabilidad.

MASAS

En la tabla se muestran los rangos en los que se ha dividido los resultados del mapa de curvatura. Se ha asignado las mayores probabilidades de deslizamiento en masa a las zonas con mayor curvatura cóncava (el agua se concentraría en mitad de la celda), esto corresponde a los datos de 0 hacia valores negativos.

CLASES	CURVATURA ESTÁNDAR	PORCENTAJE%
1	< -50	30
2	-50 a -30	20
3	-30 a -20	20
4	-20 a -10	10
5	-10 a -5	10
6	-5 a 0	5
7	0 a 5	5
8	5 a 10	0
9	10 a 20	0
10	20 a 30	0
11	30 a 50	0
12	más 50	0

FLUJOS

En los flujos se ha repartido más la probabilidad de inestabilidad, ya que el mecanismo principal de activación es la erosión superficial, por tanto es necesario que exista cierta acumulación, pero no estancamiento del agua, es decir tiene que existir cierto grado de concentración, pero también de circulación.

CURVATURA ESTÁNDAR	CLASES	PORCENTAJE%
1	< -50	17,5
2	-50 a -30	17
3	-30 a -20	17
4	-20 a -10	17
5	-10 a -5	17
6	-5 a 0	10
7	0 a 5	4,5
8	5 a 10	0
9	10 a 20	0
10	20 a 30	0
11	30 a 50	0
12	más 50	0

7.4.3 MAPAS TEMÁTICOS

7.4.3.1 Mapa de GSI

El espesor de suelos es un dato de peso a la hora de determinar la probabilidad de generación de deslizamientos. La falta de datos sobre este aspecto ha motivado que se haya optado en este proyecto a aplicar el concepto de GSI, con el objeto de asimilar los procesos de meteorización superficiales que afectan a cada litología de una forma particular.

El GSI es un índice que expresa la calidad del terreno, en él se integran características de los macizos rocosos, tales como la fracturación, tamaño de bloques, meteorización y rellenos de las juntas.

En la imagen inferior se muestra la gráfica usada para determinar el GSI, en ella se introduce la fracturación del macizo rocoso y el estado de las juntas (tales como la alteración, presencia de óxidos y rellenos...). El resultado proporciona un dato cuantitativo del estado del macizo rocoso. Los valores mas bajos corresponden al sustrato rocoso con comportamiento asimilable a un suelo (parámetros geomecánicos propios de un suelo). Los valores altos se identifican con sustrato rocoso sano, y con menos espesor de desarrollo de suelos en superficie.

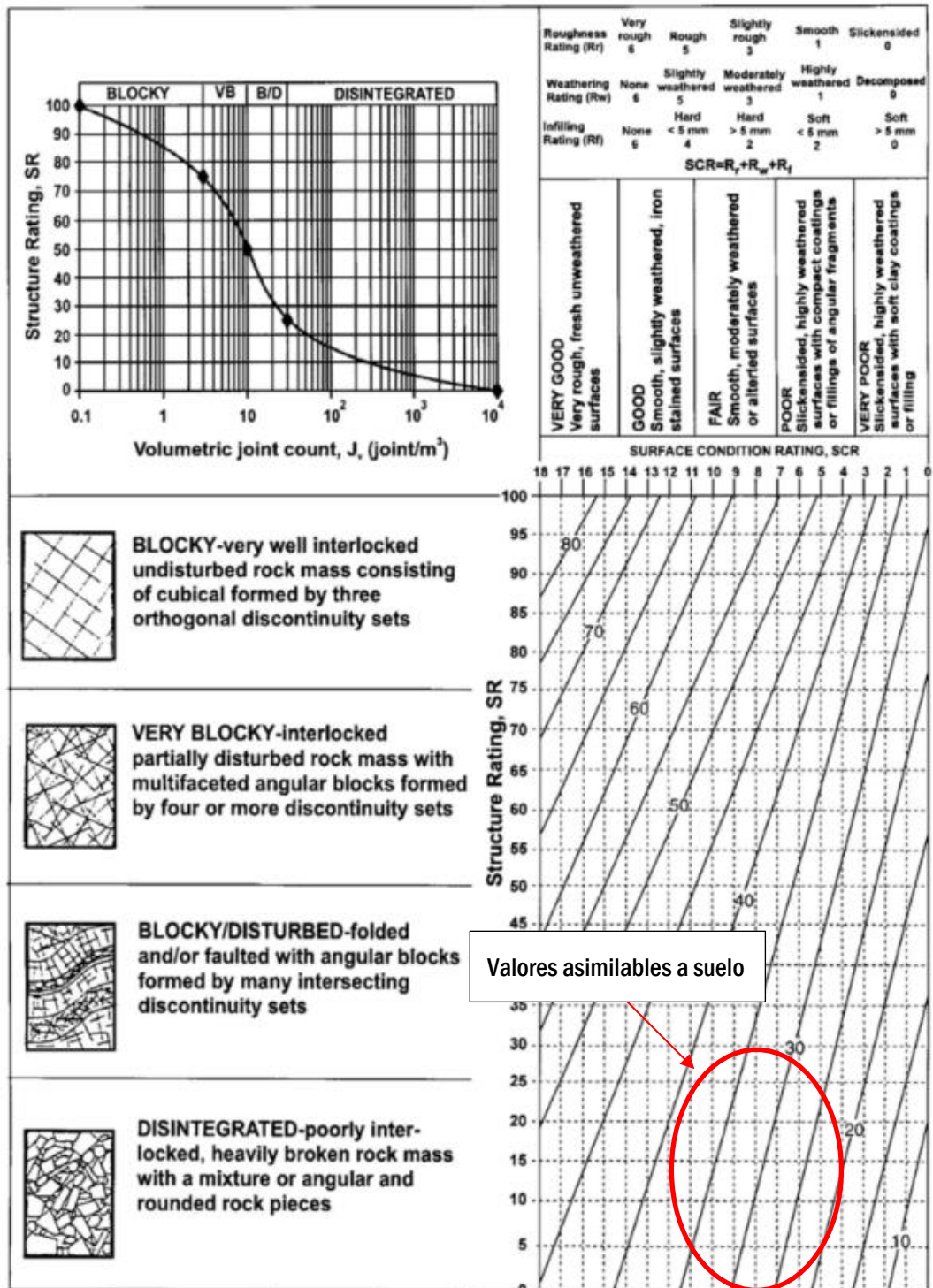


Figura 16. Cuadro multientrada para la determinación del GSI. (Hoek y Marinos)

A partir de los datos aportados por la cartografía geológica del EVE y del concepto de este índice de calidad, se ha realizado un mapa de GSI aproximado, teniendo en cuenta las características propias de cada litotipo y la proximidad a zonas de falla.

En primer lugar, se ha definido un GSI denominado como básico, determinando este índice a partir de las características propias de cada litotipo en los cinco metros más superficiales del terreno, (esta zona suele ser la más fracturadas y meteorizadas).

Una vez definido el GSI básico, se ha realizado un *buffering* de los principales rasgos tectónicos (fallas), en el interior de estos *buffering* se ha reducido en un 15% el GSI inicial, intentando recrear el efecto que produce en el macizo rocoso la tectonización (aumento de la fracturación y por tanto la meteorización, aparición de rellenos blandos...).

Se describen a continuación los valores de GSI básicos asignados en función de las características de cada litotipo:

- Los GSI de partida para las rocas calizas y calizas margosas, así como para las ígneas ha sido valores altos debidos a la baja fracturación de estos materiales (masivos en general)
- Las areniscas suelen presentarse con espesores de estratificación superiores a los dos metros, al igual que las familias principales de juntas, por lo que la fracturación es baja. Los valores de GSI serán en general de medios a altos
- En las alternancias de limolitas, margas, areniscas, calizas arenosas, típicas en el flysch se caracterizan por una fracturación en superficie alta, por este motivo sufren además procesos de meteorización más intensos. El agua penetra por las fracturas y acelera los procesos de transformación de los minerales presentes.

GSI	PORCENTAJE ESTIMADO ÁREA INESTABLE (%)
0-10	50
10-20	20
20-30	15
30-40	10
40-50	5
50-60	0
>60	0

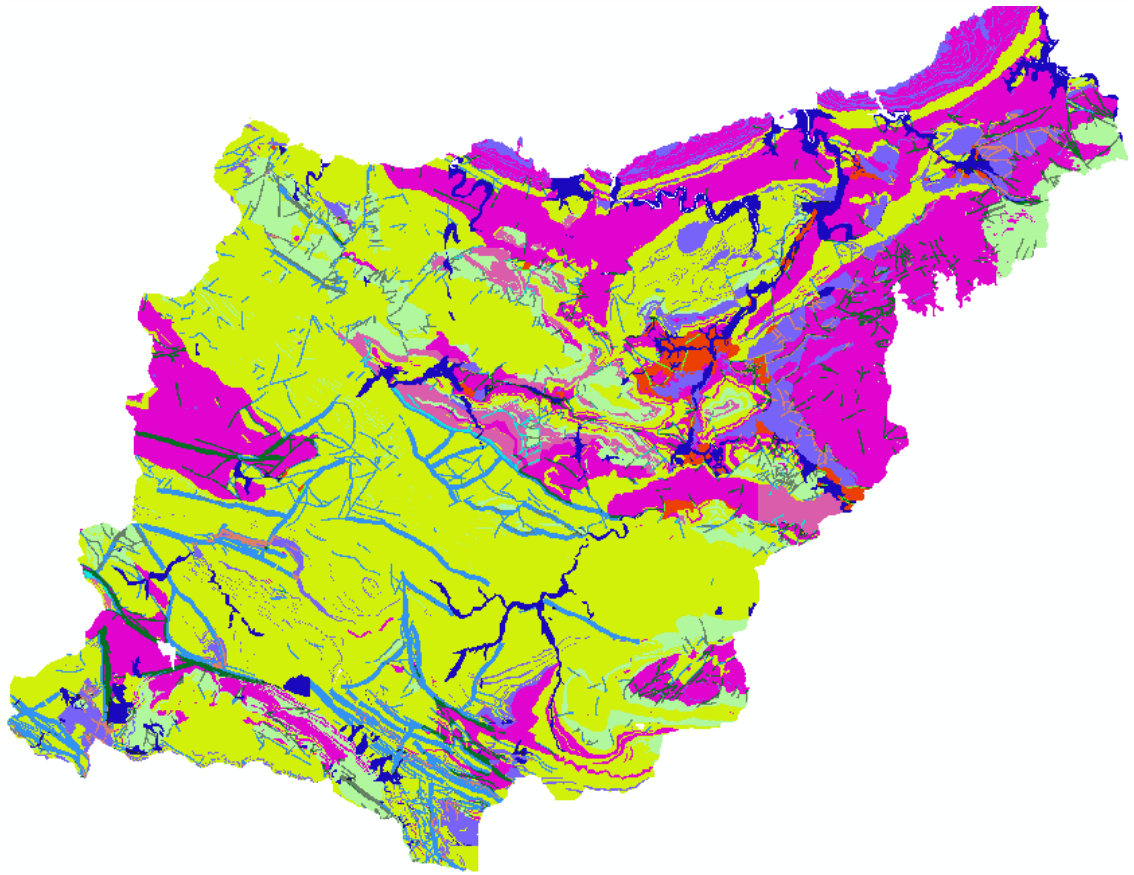


Figura 17. Mapa de GSI real, en el que cada color corresponde a un valor de GSI.

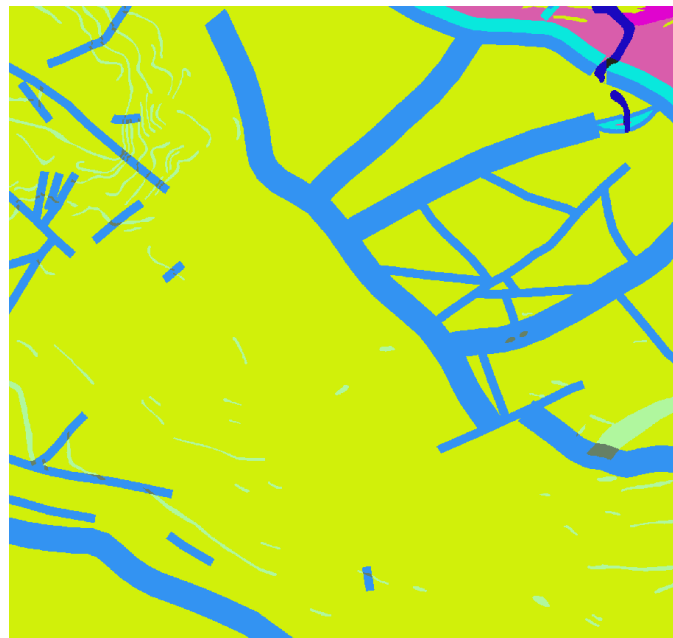


Figura 18. Detalle del mapa de GSI, donde se pueden apreciar los buffer alrededor de las fallas.

7.4.3.2 Mapa de usos del suelo

El tipo de vegetación y su densidad influyen en el comportamiento de las laderas, tanto en la respuesta mecánica como hidrológica. La presencia de raíces mejora las características resistentes e influye en la capacidad de infiltración, disminuyendo además la erosión.

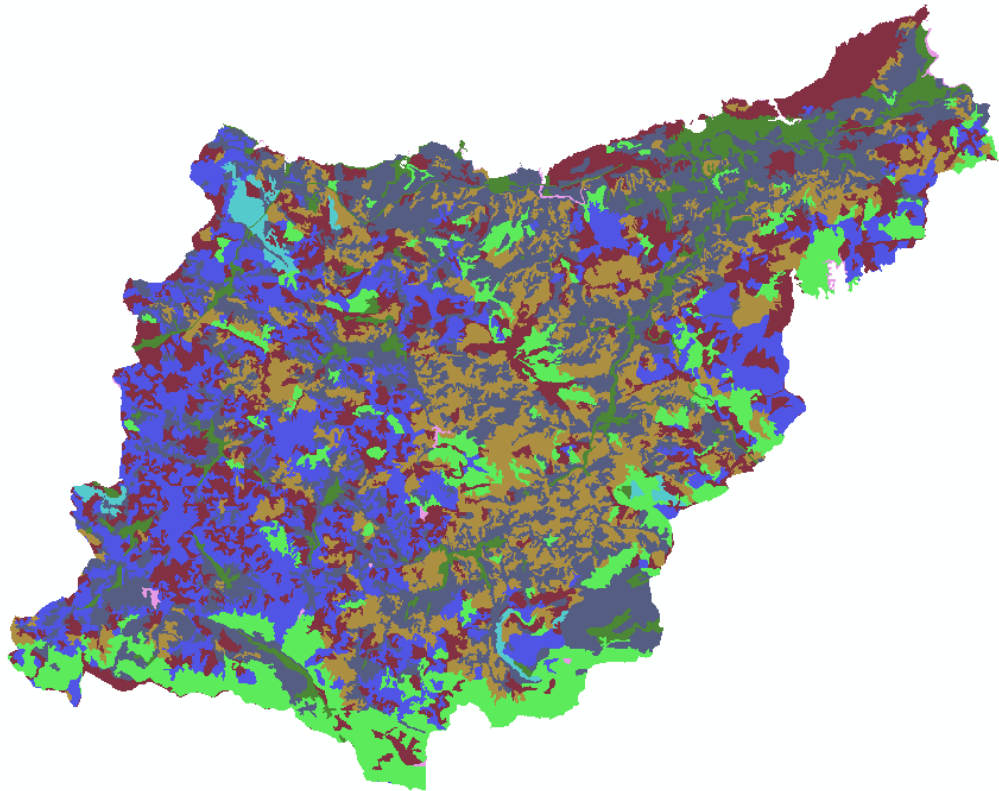


Figura 19. Mapa de usos del suelo reclasificado del THG.

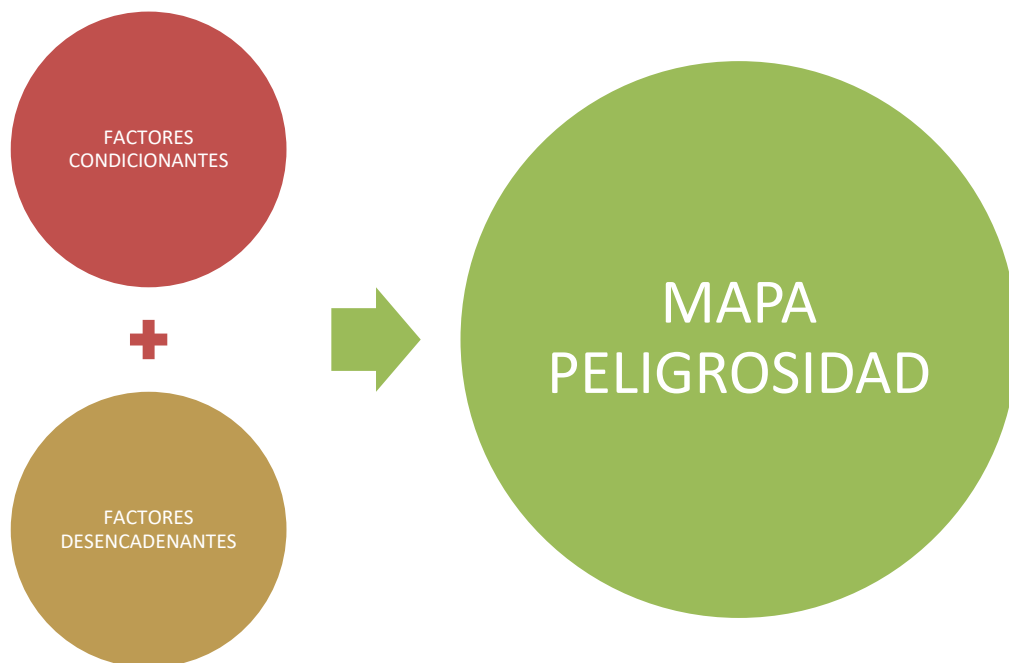
Las zonas con prados, pastos y matorral son las que presentan mayor probabilidad de sufrir deslizamientos, la escorrentía superficial y la infiltración es mayor que en zonas de bosque.

USOS DEL SUELO	DESCRIPCIÓN	PORCENTAJE ESTIMADO DE ÁREA INESTABLE %
1	Bosque muy denso de frondosa	4
2	Bosque denso de frondosa	7
3	Bosque semiabierto de frondosa	11
4	Bosque muy denso de conífera	4
5	Matorral	35
6	Prados, pastos y cultivos	38
7	Zonas sin vegetación	1

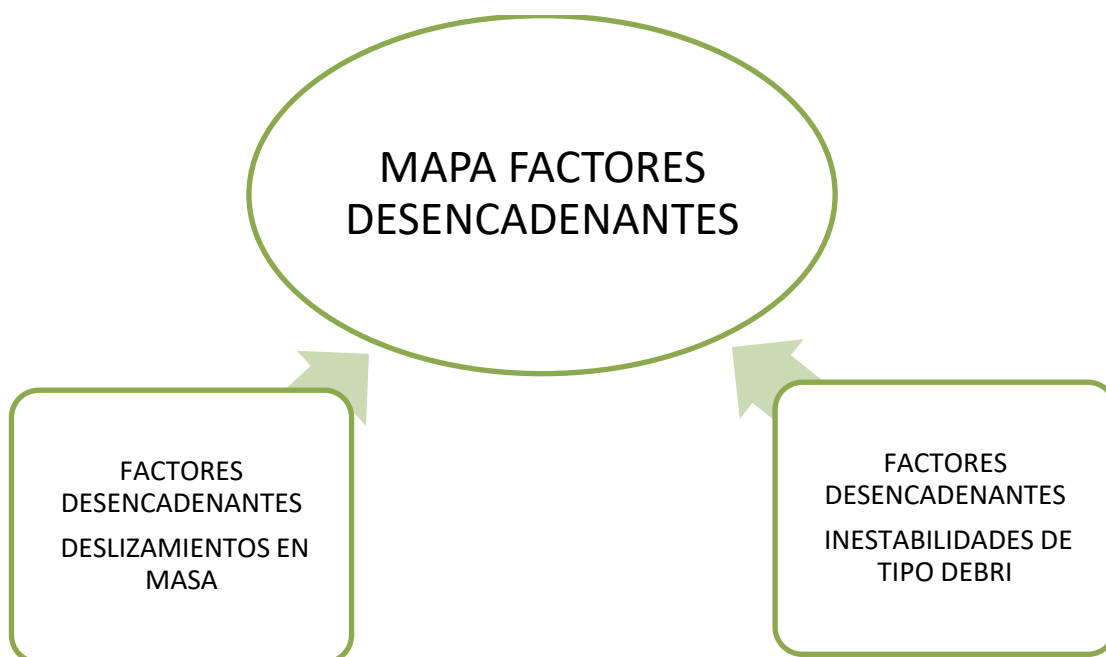
8. MAPAS DE PELIGROSIDAD. DEFINICIÓN DE LOS FACTORES DESENCADENANTES

Volviendo a la definición inicial descrita en el apartado 5.2.2, se define la peligrosidad ante deslizamientos, como la probabilidad de que ocurra una inestabilidad en un lugar determinado en un intervalo de tiempo definido.

Para la determinación de la probabilidad se integran los valores de susceptibilidad con los factores que activan los procesos de inestabilidad.



Cabe recordar que se ha realizado un análisis de la susceptibilidad para deslizamientos en masa y para flujos, se continúa en esta línea tratando de modelizar cada tipo de evento en función de los procesos naturales que lo gobiernan. Por ello, además del factor desencadenante principal que es la precipitación, se analiza la forma en la que esta afecta al terreno dependiendo de características morfológicas.



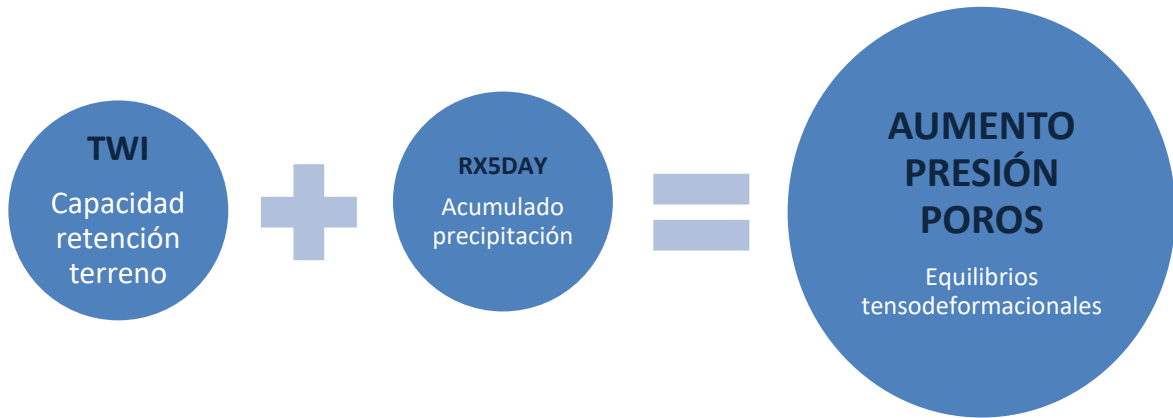
8.1 DETERMINACIÓN DE LA PELIGROSIDAD PARA DESLIZAMIENTOS EN MASA

Para elaborar la cartografía de peligrosidad ante deslizamientos en masa (rotacionales o traslacionales), se ha tomado como **factor detonante del proceso la saturación del suelo**, debido a que estos procesos se desencadenan con gran frecuencia (siempre que se produzcan sin intervención humana) por un aumento de la presión en poro de los materiales.

El efecto del agua en el terreno da lugar a presiones que alteran los estados tensionales, por presiones intersticiales y aumento del peso del terreno, se producen además procesos de erosión interna y externa, todo lo cual da lugar a **modificación de las propiedades y resistencia de los materiales**.

Para calcular la **capacidad de saturación del terreno**, se han tomado en consideración el **índice topográfico de humedad (TWI)** y la **precipitación máxima acumulada en 5 días (RX5DAY)** para el periodo histórico y horizontes temporales requeridos. Los datos de

precipitación acumulada han sido los aportados por el proyecto **KLIMATEK**, para los **escenarios 4.5 y 8.5**.



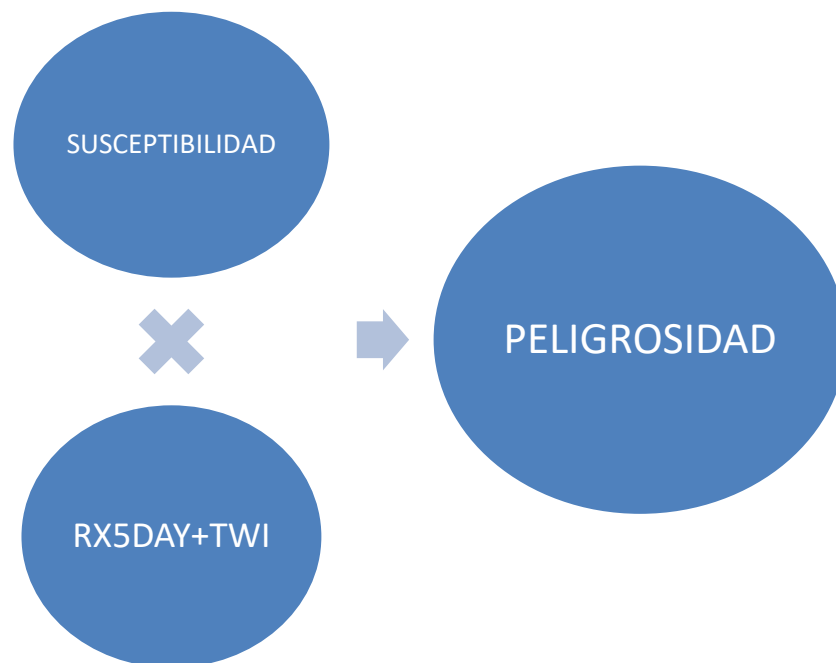
La razón de utilizar este factor, se refiere a la **necesidad de simular el incremento de presiones de agua del terreno, y la pérdida de resistencia del mismo debido a la saturación**. Para que se de este efecto, se requiere que el terreno se sature y para ello es necesaria la acumulación de agua dentro del mismo. La acumulación de agua vendrá definida por la cantidad que puede llegar (debido al área de cuenca) a una zona determinada y la capacidad de drenaje del material. Este aspecto es abordado por el parámetro TWI, índice topográfico de humedad, el cuál incorpora en su algoritmo la cuantificación del área de recepción de escorrentía superficial y la capacidad de drenaje (aspecto relacionado con la pendiente del terreno).

Una vez definida la capacidad de saturación del terreno, se debe modelizar la cantidad de agua que le llega, para ello, junto con este concepto de TWI e iterando con él, se trabaja con el **RX5DAY**, que hace referencia a las cantidades de precipitaciones de agua acumuladas en 5 días. Se entiende que es una manera de simular la cantidad de agua que precipita en períodos prolongados. Períodos estos que logran una saturación del terreno, es decir que parte del agua no se evacúa mediante escorrentía superficial, infiltrándose y saturando el terreno.

La experiencia que se tiene en el estudio de deslizamientos de ladera en Gipuzkoa, nos dice que **sería más adecuado trabajar con períodos de acumulaciones de agua mayores**,

períodos entre 7 y 14 días de acumulación. Este intervalo de tiempo suele ser el necesario para que se sature el terreno dando tiempo a ajustes en la evapotranspiración, infiltración y por tanto en la saturación lograda por el terreno. No obstante, se ha trabajado con RX5DAY por ser el dato que más se aproxima al modelo de simulación de deslizamientos que aporta KLIMATEK.

Como ya se ha mencionado en apartados anteriores la peligrosidad se determina por el efecto de los factores desencadenantes sobre los condicionantes. Para reproducir esta situación, se ha optado por multiplicar factor desencadenante y susceptibilidad, con lo que se está generando un efecto sobre cada factor condicionante.



8.1.1 MAPAS GENERADOS. ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE HUMEDAD (TWI) Y ESCENARIOS CLIMÁTICOS

Se desarrolla a continuación el concepto de índice topográfico de humedad, mostrándose sus resultados en forma de mapas, así mismo se incluyen salidas gráficas del factor desencadenante aplicado (TWI+ESCENARIO CLIMÁTICO).

ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE HUMEDAD

El índice topográfico de humedad (TWI: Topographic Wetness Index), es la variable que define la tendencia de una célula a acumular agua. Expresa el volumen relativo y la cantidad de movimiento del flujo que pasa por cada celda (pixel) del terreno.

$$TWI = \ln (Ca / \tan \beta)$$

Ca: área de acumulación de flujo en la celda.

β : indica el ángulo de pendiente de la celda.

A mayor área drenada y menor pendiente se incrementa la concentración y la saturación hídrica, áreas con valores altos de TWI son zonas de concentración y saturación.

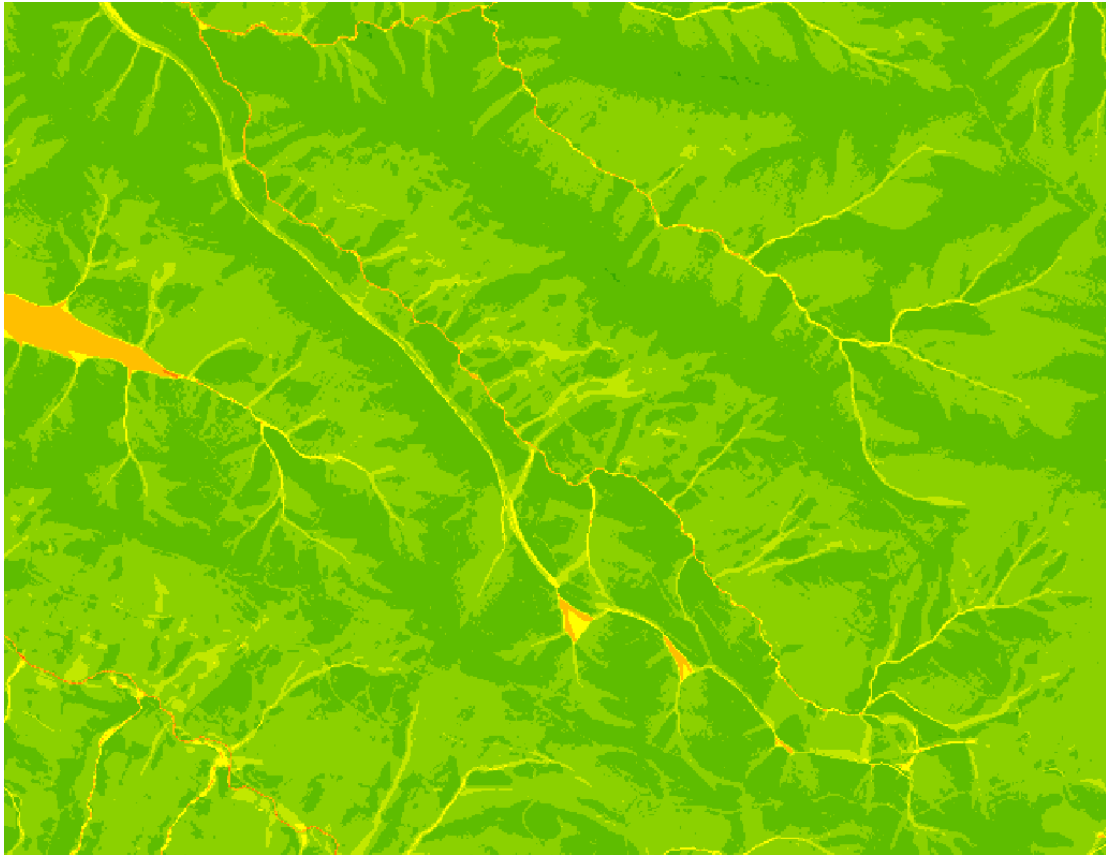


Figura 20. Extracto del mapa de salida de TWI. Se observan las zonas de aristas en verde oscuro, lo que corresponde a TWI muy bajos. Las zonas del amarillo al naranja se sitúan en zonas de canales y valles, con valores más altos de TWI.

El TWI, no siendo a priori un factor desencadenante, se ha considerado como tal en el análisis realizado, con el objetivo de modelizar de una forma diferenciada el efecto de la precipitación sobre el terreno.

El mapa de TWI realizado muestra un rango de salidas de entre -0,52 a 25,16, reclasificándose en 9 intervalos iguales.

8.1.2 ANÁLISIS PRELIMINAR DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN MAPAS DE PELIGROSIDAD MASAS.

Los mapas obtenidos son en general bastante representativos respecto a las zonas donde existe mayor probabilidad de producirse deslizamientos en masa (peligrosidad). No obstante, se han detectado errores en las zonas de llanuras aluviales amplias, como podría ser el caso de ríos como Urumea, Oria y Urola en su recorrido final. En estas zonas el factor TWI es muy alto, dando lugar a una probabilidad sobrestimada, ya que estas zonas coinciden con áreas de muy poca pendiente y, por tanto, poca o nula capacidad para generar deslizamientos.

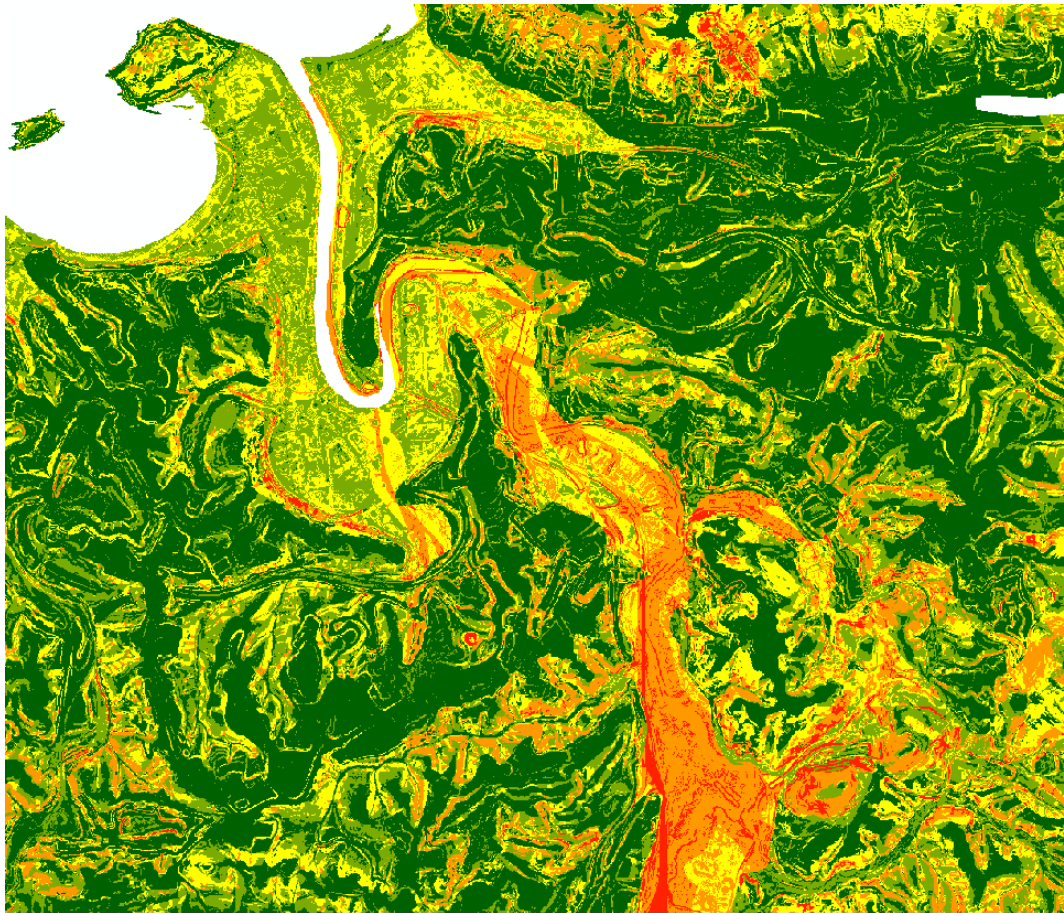


Figura 21. Imagen mapa de peligrosidad para deslizamientos en masa. Se pueden observar zonas de color rojo y naranja (correspondiente a peligrosidad muy alta y alta) en zonas de llanura aluvial del río Urumea.

8.2 DETERMINACIÓN DE LA PELIGROSIDAD EN INESTABILIDADES DE TIPO FLUJOS.

Para definir la peligrosidad para inestabilidades de tipo flujos, se ha tomado como factor detonante la escorrentía superficial. Para ello, se considera por una parte el agua que precipita en periodos intensos de lluvias y por otra la cantidad de escorrentía superficial que pasa por una determinada zona en función de la cuenca que se sitúa tras él.

Para determinar la cantidad de agua que discurre por la ladera, se ha tenido en cuenta un factor que pronostica eventos de precipitaciones intensas a modo de tormentas o períodos cortos de fuertes precipitaciones. Este factor se ha modelizado tomando la **intensidad máxima en 24 horas de serie de día húmedo (SDII)**, para los escenarios 4.5 y 8.5. Los datos diarios de precipitación empleados han sido los obtenidos con metodologías de corrección de sesgo (EQM) aportados por IHOBE.

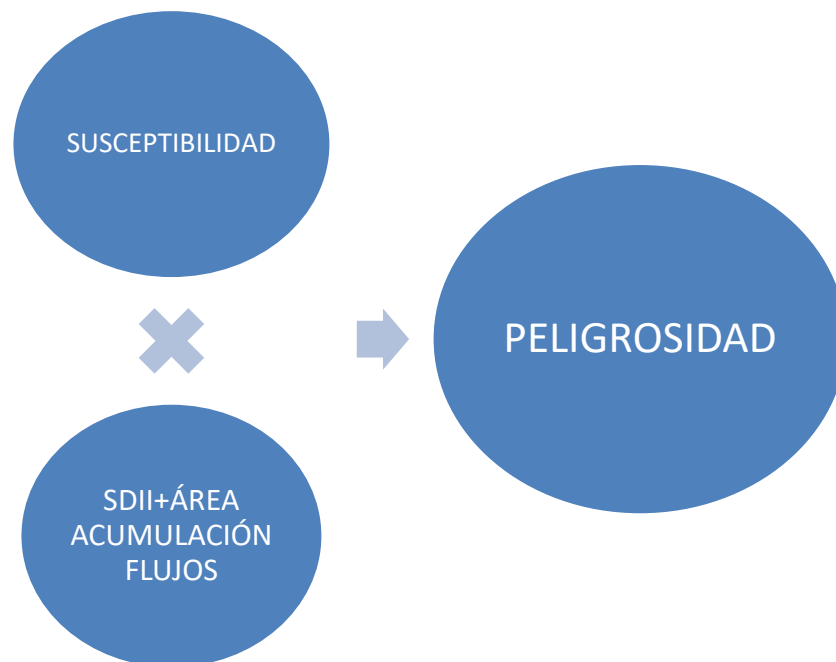
El SDII es un valor de intensidades en días húmedos, lo que implica que el terreno ya dispone de una cierta saturación, aspecto este fundamental para la activación de este tipo de inestabilidades.

Sería conveniente poder realizar el análisis con valores de intensidades en 12 horas. La experiencia que se dispone referente a este tipo de procesos indica que intensidades importantes en períodos de tiempo de 12 horas tienen gran importancia en el desencadenamiento de estos procesos. No obstante, se ha trabajado con la intensidad máxima de 24 horas por ser el dato que más se aproxima al modelo de simulación de deslizamientos que aporta KLIMATEK.

Para determinar la cantidad relativa de flujo que pasa por un determinado punto se ha generado un mapa de acumulación de flujo, el cual representa la cantidad de flujo que pasa por una determinada zona, en función de la cuenca que se sitúa tras la misma.



Al igual que para la determinación de la peligrosidad para deslizamientos en masa se ha optado por multiplicar factor desencadenante y susceptibilidad:



8.2.1 MAPAS GENERADOS. ÁREA DE ACUMULACIÓN DE FLUJOS Y ESCENARIOS CLIMÁTICOS

El mapa de área de acumulación de flujo representa la cantidad de flujo que pasa por una determinada zona, en función de la cuenca que se sitúa tras la misma.

Las zonas de cimas y arista son las que menor área de acumulación presentan, mientras que las zonas de vaguadas, las de mayor área de acumulación de flujos.

Los valores obtenidos al realizar el mapa varían entre los 25 y los 645.689 m², reclasificando dicho mapa en los siguientes rangos:

CLASE	RANGO VALORES
1	25-50
2	50-100
3	100-500
4	500-1.000
5	1.000-10.000
6	10.000-100.000
7	100.000-1.000.000
8	1.000.000-100.000.000
9	100.000.000-645.689.728

8.2.2 ANÁLISIS PRELIMINAR DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN MAPAS DE PELIGROSIDAD FLUJOS.

Al igual que ocurre en los mapas de peligrosidad de deslizamientos en masa, el factor de área de acumulación de flujos da lugar a resultados anómalos de peligrosidad en las zonas de llanuras aluviales amplias. En estos tramos del recorrido de ríos de gran caudal, tales como, Urumea y Oria, se obtienen como es lógico valores muy altos de áreas de acumulación de flujos. En el mapa de peligrosidad aparecen zonas con pendientes inferiores a 5 grados y peligrosidad moderada, lo cual no es posible.

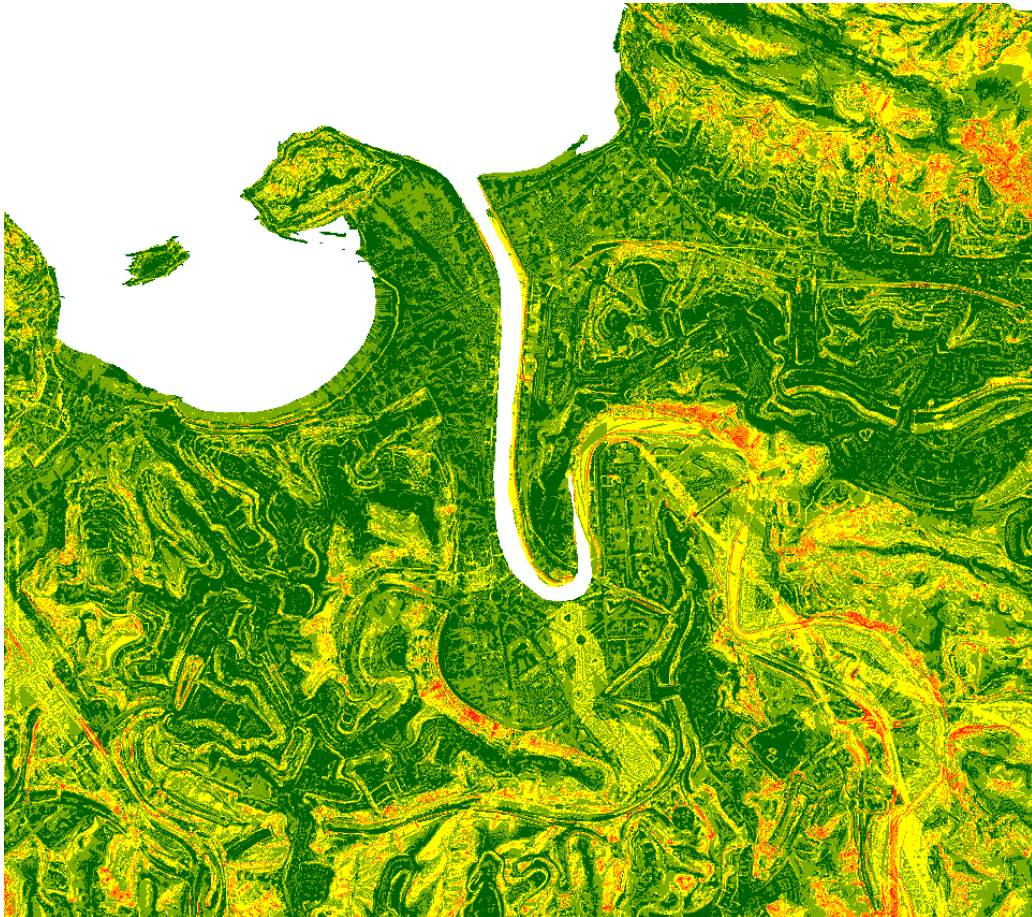


Figura 22. Imagen mapa de peligrosidad para deslizamientos en masa. Se pueden observar zonas de color rojo y naranja (correspondiente a peligrosidad muy alta y alta) en zonas de llanura aluvial del río Urumea.

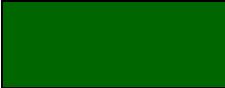




9. RESULTADOS

Los resultados de los análisis realizados, se desarrollan en este apartado siguiendo las fases aplicadas en la metodología, es decir, en primer lugar se expone los resultados de los análisis de susceptibilidad para los dos tipos de inestabilidades analizadas, para terminar con la peligrosidad para los dos tipos de inestabilidades, en los dos escenarios analizadas y en los cuatro intervalos temporales que se han modelizado.

9.1 MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD. RESULTADOS.

Con los resultados del análisis realizado se ha generado un mapa de susceptibilidad, el cual se muestra en la imagen inferior.

Los valores obtenidos al aplicar el algoritmo, se han agrupado en 9 clases, de menor a mayor susceptibilidad. A su vez, estas nueve clases se han agrupado para poder dar un resultado cualitativo al valor de susceptibilidad. Asignándosele además un código de colores a cada nivel:

CÓDIGO COLOR	DENOMINACIÓN CUALITATIVA SUSCEPTIBILIDAD
	Muy Bajo
	Bajo
	Moderado
	Alto
	Muy Alto

9.1.1 MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD INESTABILIDADES TIPO FLUJO

Los resultados del mapa de susceptibilidad para inestabilidades de tipo flujo muestran, tal y como se observa en la imagen inferior, que de forma predominante en el THG la susceptibilidad es de baja a moderada.

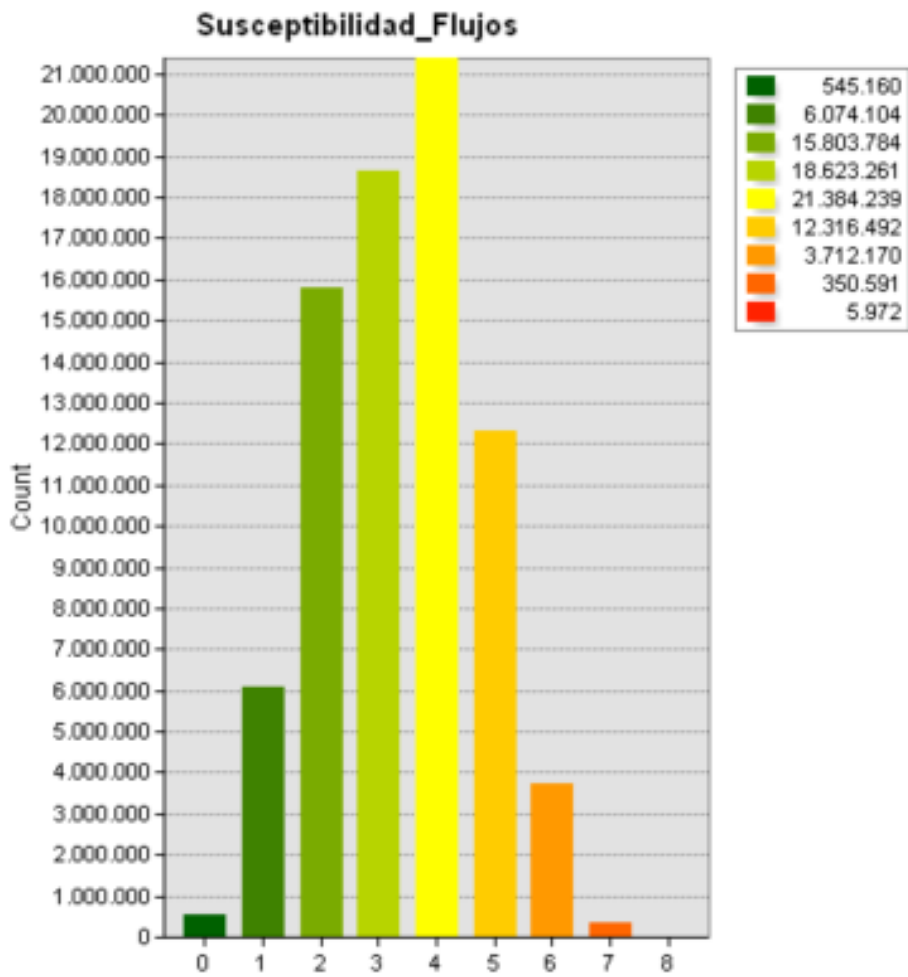


Figura 23. Mapa de susceptibilidad del THG frente a inestabilidades tipo flujo, a escala 1/250.000.

Las zonas con susceptibilidad de moderada a muy alta se concentran en las zonas montañosas, donde se da la presencia de los factores condicionantes de este tipo de inestabilidades.

Estas son la Sierra de Aizkorri y Aratz entre Navarra y Álava, y la Sierra de Elgea entre Gipuzkoa y Alava, todas al sur del THG. En la zona central se encuentra el macizo de Ernio. Ya hacia el noreste se sitúa el Macizo de Cinco Villas y, finalmente, hacia la costa se sitúan el monte Jaizkibel y la cadena en la que se encuentra el Igeldo y Mendizorrotz.

El histograma realizado con los valores de susceptibilidad de cada pixel, muestra que la mayoría de los datos se localizan en zonas de susceptibilidad baja a moderada, por tanto, la forma de la curva de distribución es asimétrica, existiendo menos valores en zonas con susceptibilidad de moderada a muy alta, tal y como puede verse en el gráfico que se muestra a continuación:



9.1.2 MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTOS EN MASA

En el mapa de susceptibilidad para deslizamientos en masa se observa que el THG se encuentra en general en rangos de susceptibilidad entre bajo y moderado. De forma similar a la susceptibilidad de flujos, las áreas donde ésta es más alta, se sitúan en las zonas con mayor relieve del territorio. De norte a sur, el macizo de Cinco Villas, en la zona central el Macizo de Ernio y de Izarraitz, y al sur las Sierras de Elgea, Aizkorri y la continuación de Aralar, concentrándose en estas últimas las áreas con mayor susceptibilidad.

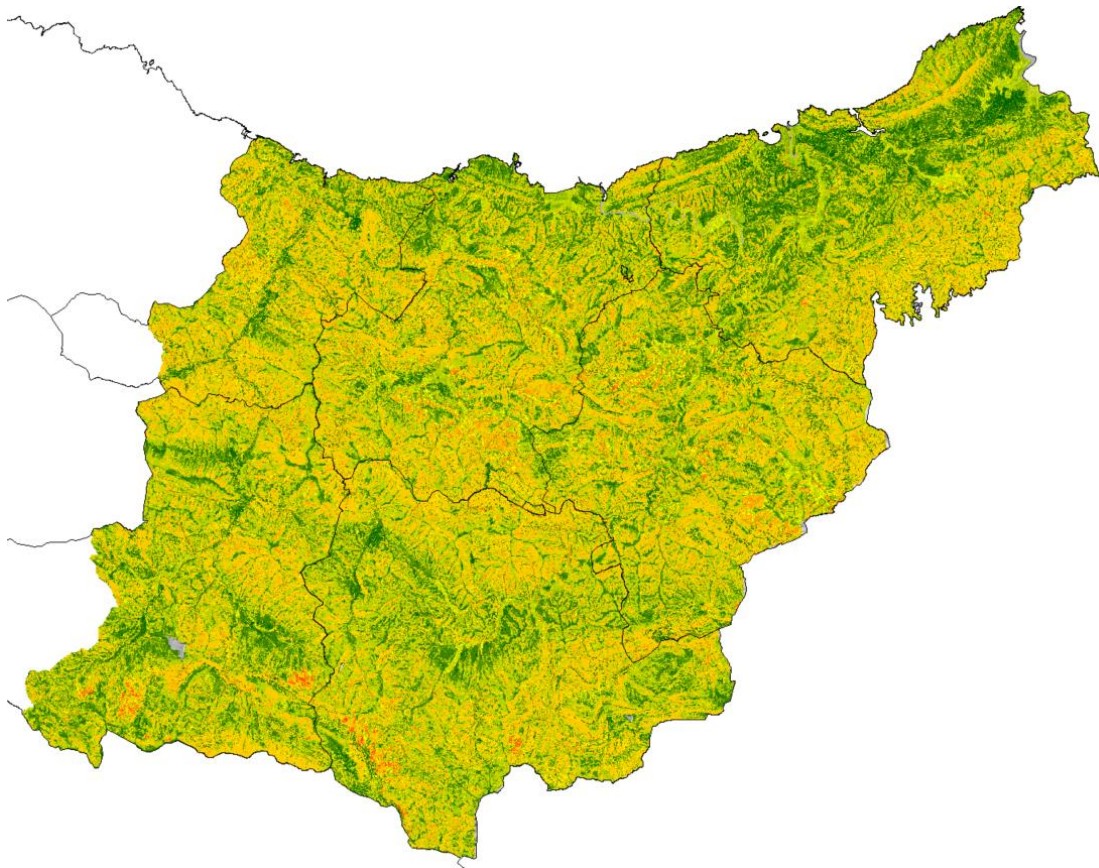
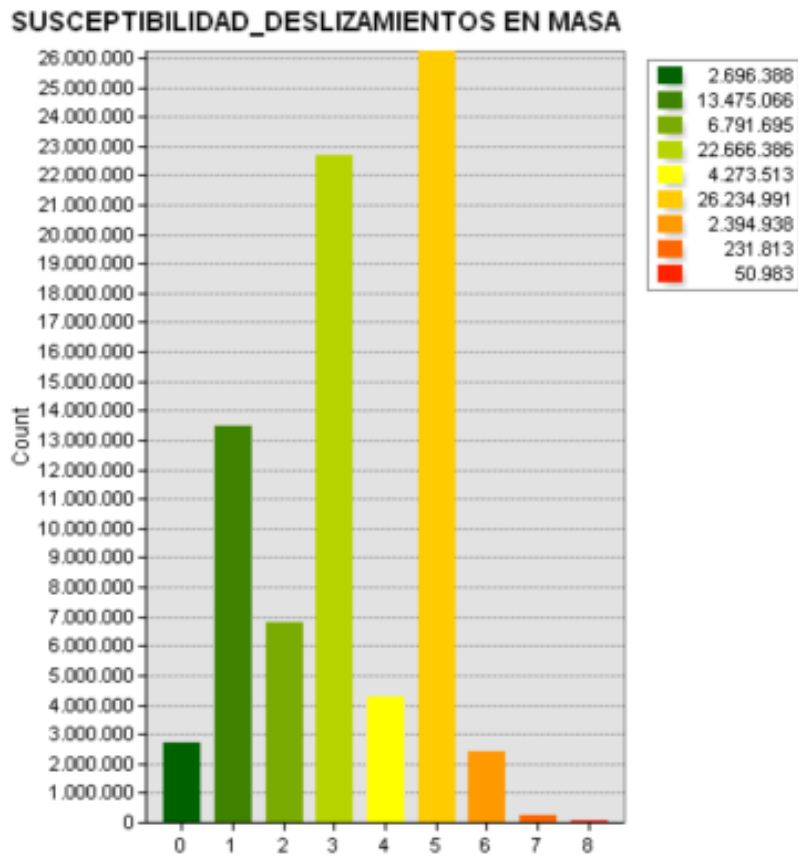


Figura 24. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos en masa del THG a escala 1/250.000.

En la zona sur del THG, se distinguen varios ámbitos con susceptibilidad muy alta, estas son hacia el este en el municipio de Eskoriatza, las laderas del monte Axkorri, en el municipio de Oñati la falda norte de la cresta formada por el pico Gorgomendi y Buetraitz. Hacia el sureste, las laderas norte de la sierra de Aizkorri se sitúan en zonas de susceptibilidad muy alta.

La franja que queda entre Donostia e Irun destaca por la baja susceptibilidad de sufrir este tipo de deslizamientos.



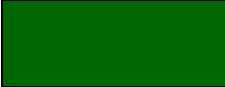




La distribución que se observa en el histograma, muestra que la mayoría de valores se encuentran en el rango de susceptibilidad baja a alta, con una importante concentración de valores en situación de susceptibilidad alta y muy pocos en muy alta.

9.2 MAPAS DE PELIGROSIDAD

Como resultado del análisis de la peligrosidad para dos tipos de deslizamiento, en dos escenarios climáticos y cuatro periodos temporales se han generado 16 mapas, los cuales se dividen según inestabilidad tipo y con dos subgrupos para los escenarios, a modo de cuadro y como resumen se presenta la siguiente tabla:

TIPO INESTABILIDAD	ESCENARIO KLIMATEK	PROYECCIÓN TEMPORAL
FLUJOS	Periodo histórico 1971-2015	
	4.5	2011-2040
		2040-2070
		2070-2100
	Periodo histórico 1971-2015	
	8.5	2011-2040
		2040-2070
		2070-2100
	DESLIZAMIENTOS EN MASA	Periodo histórico 1971-2015
4.5		2011-2040
		2040-2070
		2070-2100
Periodo histórico 1971-2015		
8.5		2011-2040
		2040-2070
		2070-2100

Se ha mantenido el código de color asignado a la susceptibilidad para determinar de una manera cualitativa el riesgo:

CÓDIGO COLOR	DENOMINACIÓN CUALITATIVA SUSCEPTIBILIDAD
	Muy Bajo
	Bajo
	Moderado
	Alto
	Muy Alto

A continuación, se exponen los resultados del análisis de peligrosidad realizado a escala de territorio para el escenario 4.5 y 8.5.

9.2.1 MAPAS DE PELIGROSIDAD FRENTE A INESTABILIDADES TIPO FLUJO

PERIODO HISTORICO 1971-2015

En la imagen inferior a escala 1/250.000, se observa que el territorio se encuentra en general, en el rango de peligrosidad de muy baja a baja. Diferenciándose de forma evidente dos zonas con peligrosidad de media a muy alta.

De oeste a este, la primera coincide con el Macizo de Izarraitz y sus estribaciones norte, en continuación al sur, la zona denominada Irukurutzeta, entre Soraluze, Bergara y Azkoitia.

La otra gran área que se distingue con facilidad, es la situada al límite con Navarra, son el Macizo de las Cinco Villas, continuando hacia el sur en los montes de Berastegi y Elduain.

Se distinguen otras zonas de menor entidad hacia el sur, en las cimas al norte de Arantzazu, y en la zona de la Sierra de Enirio-Aralar, por último, en la zona central de la provincia el macizo de Ernio.

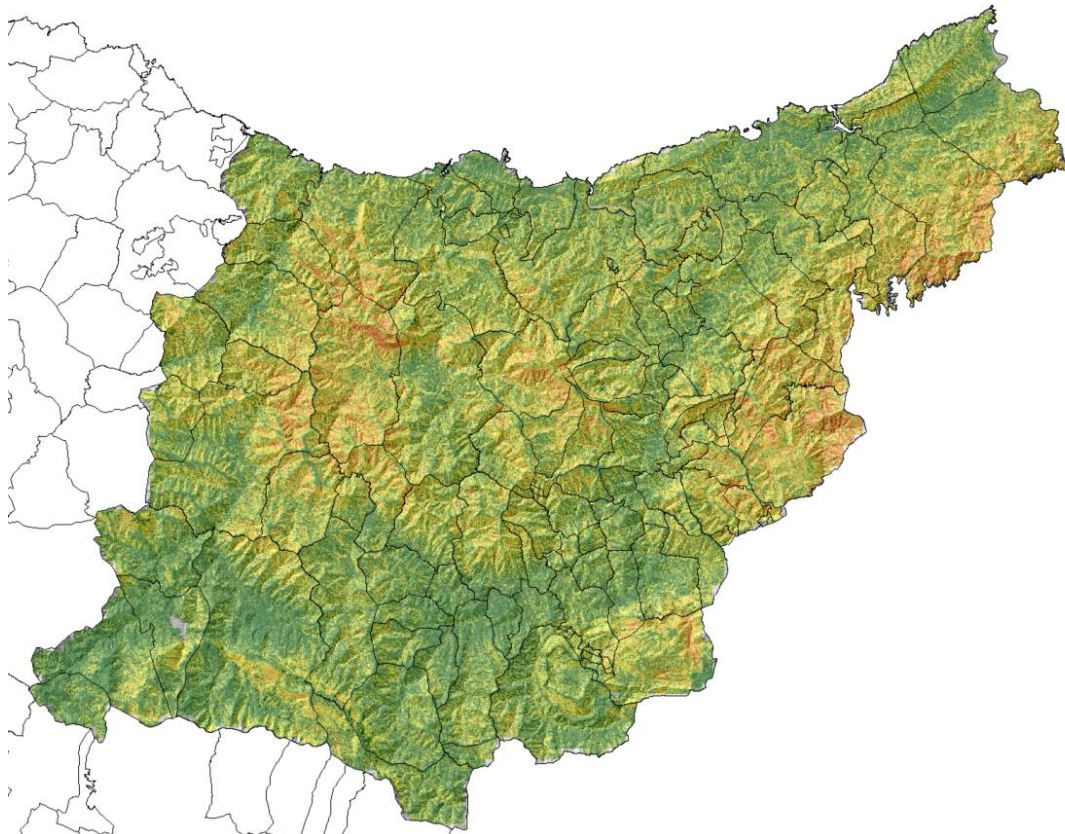


Figura 25. Mapa de peligrosidad frente a inestabilidades de tipo flujo del THG a escala 1/250.000, periodo histórico.

PROYECCIÓN CLIMÁTICA 2010-2040

En los resultados de peligrosidad para la proyección climática 2011-2040, lo primero que llama la atención es que la peligrosidad general del territorio aumenta, aparecen más zonas en riesgo moderado alrededor de las zonas con mayor probabilidad en el periodo histórico. Además, en estas zonas, que en el periodo histórico aparecían con mayor probabilidad de sufrir flujos, han aumentado la peligrosidad, se observan más celdas en colores rojos correspondientes a peligrosidad muy alta.

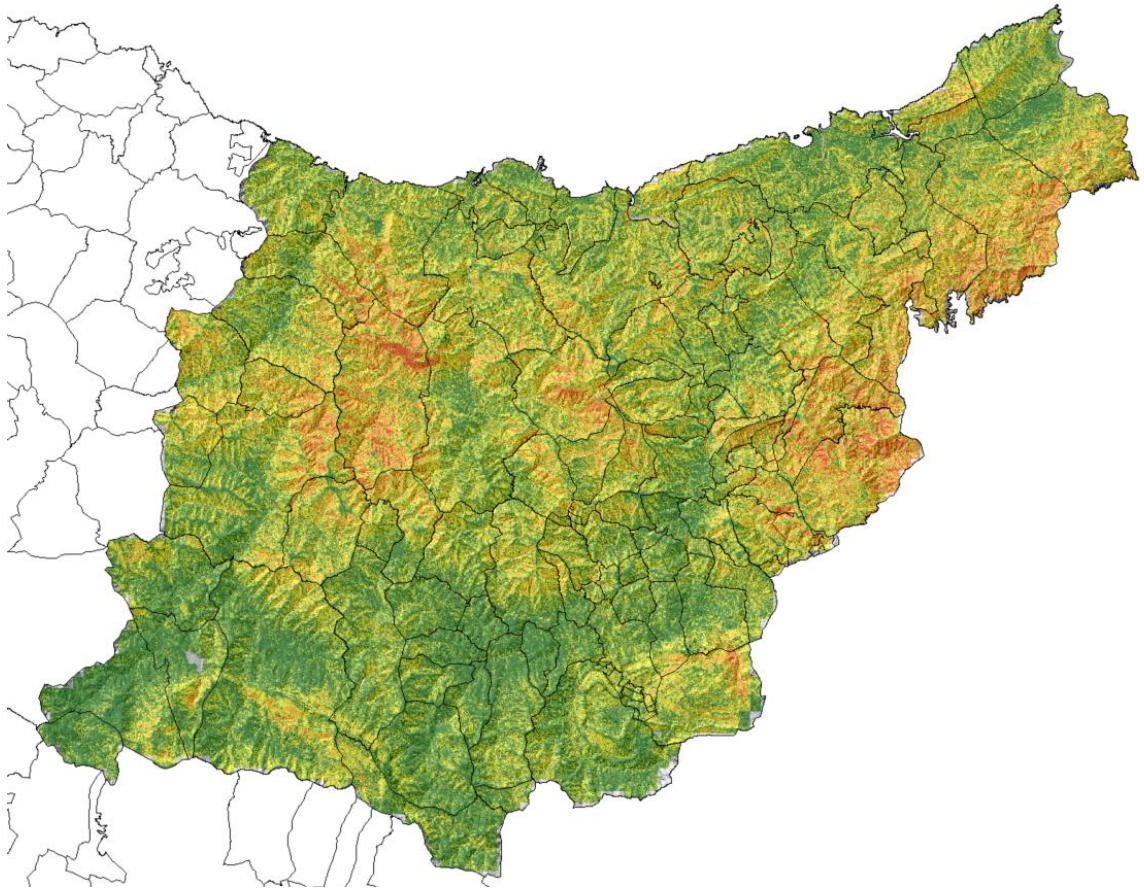


Figura 26. Mapa de peligrosidad frente a inestabilidades de tipo flujo del THG a escala 1/250.000, para el escenario 4.5 y proyección 2010-2040.

No se observan diferencias significativas entre los resultados obtenidos en el escenario 4.5 con el 8.5. Por señalar algún rasgo diferente se podría señalar que las zonas de peligrosidad alta a muy alta se encuentran más conectadas en el 4.5, mientras que en el 8.5 la apariencia es de menor continuidad espacial, con una apariencia de “mosaico”.

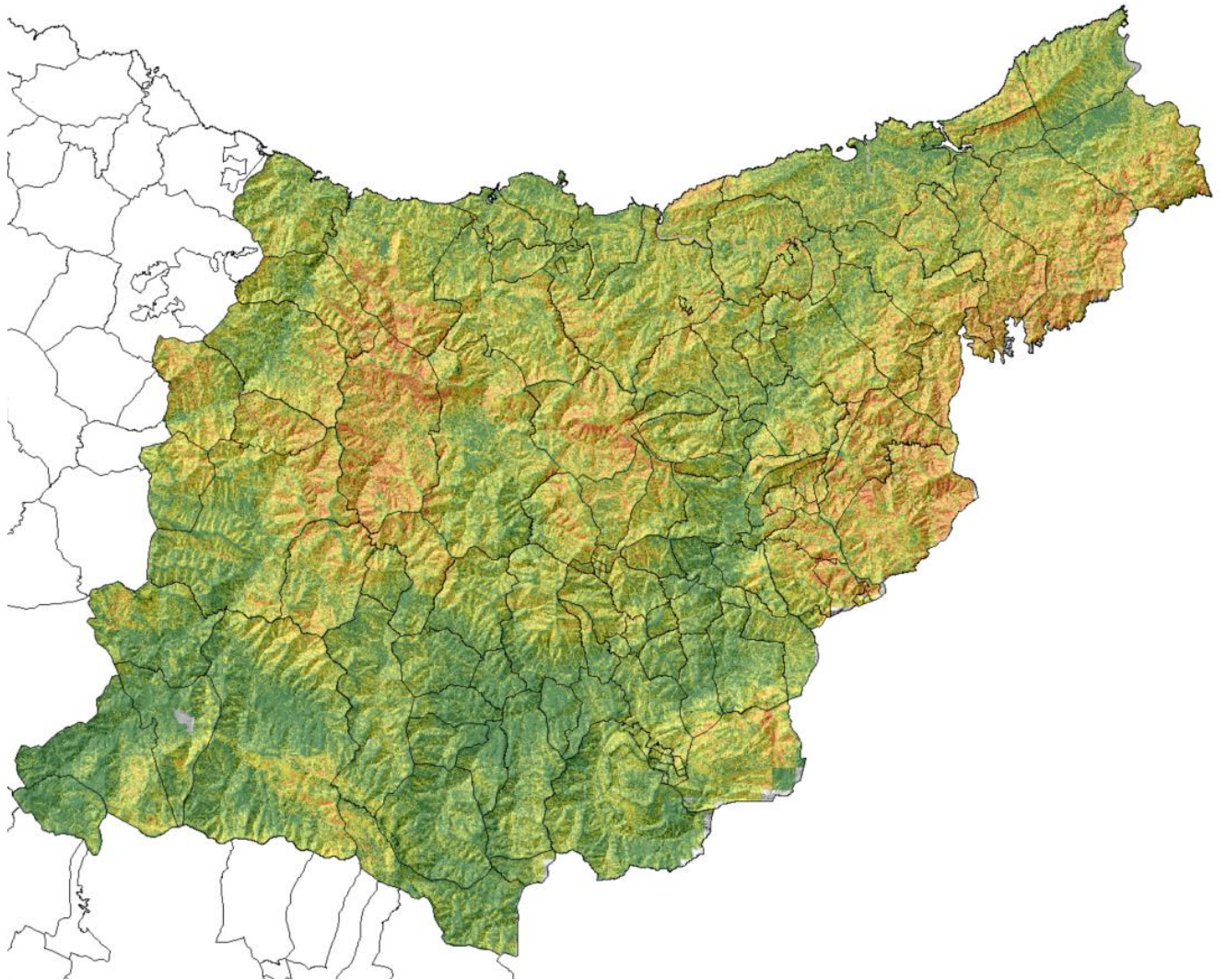


Figura 27. Mapa de peligrosidad frente a inestabilidades de tipo flujo del THG a escala 1/250.000, para el escenario 8.5 y proyección 2010-2040.

PROYECCIÓN CLIMÁTICA 2040-2070

En el escenario 4.5 la peligrosidad aumenta en general para todo el territorio, las áreas con peligrosidad moderada son las predominantes en los dos tercios norte del mismo.

Las zonas que se han ido identificando con mayor probabilidad, desde el periodo histórico, siguen aumentando el número de píxeles afectados por peligrosidad alta a muy alta.

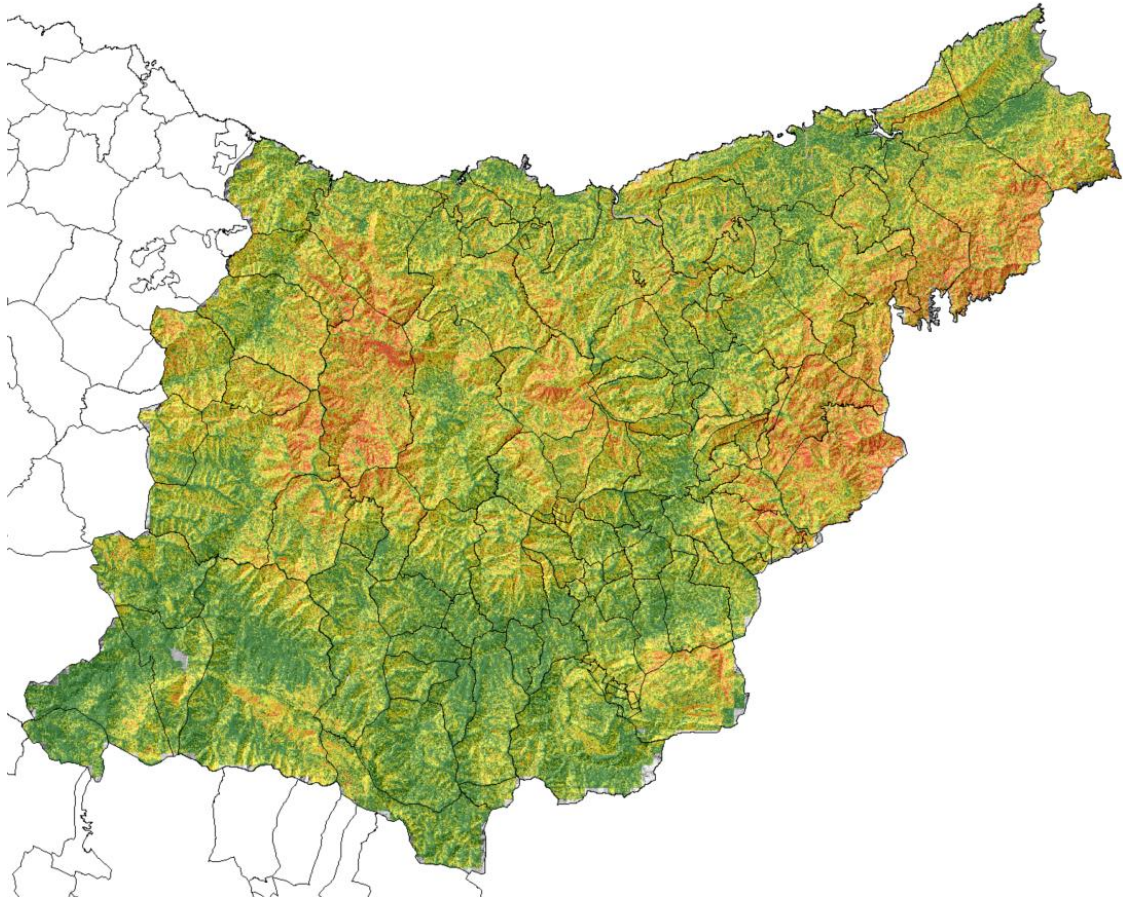


Figura 28. Mapa de peligrosidad frente a inestabilidades de tipo flujo del THG a escala 1/250.000, para el escenario 4.5 y proyección 2040-2070.

El escenario 8.5 muestra una tendencia a la disminución de la peligrosidad en general en todo el territorio, quedando concentrada la peligrosidad de moderada a muy alta en la zona del Macizo de Izarraitz, Macizo de Ernio y Macizo de las Cinco Villas, continuando hacia el sur con las zonas montañosas de Elduain y Berastegi.

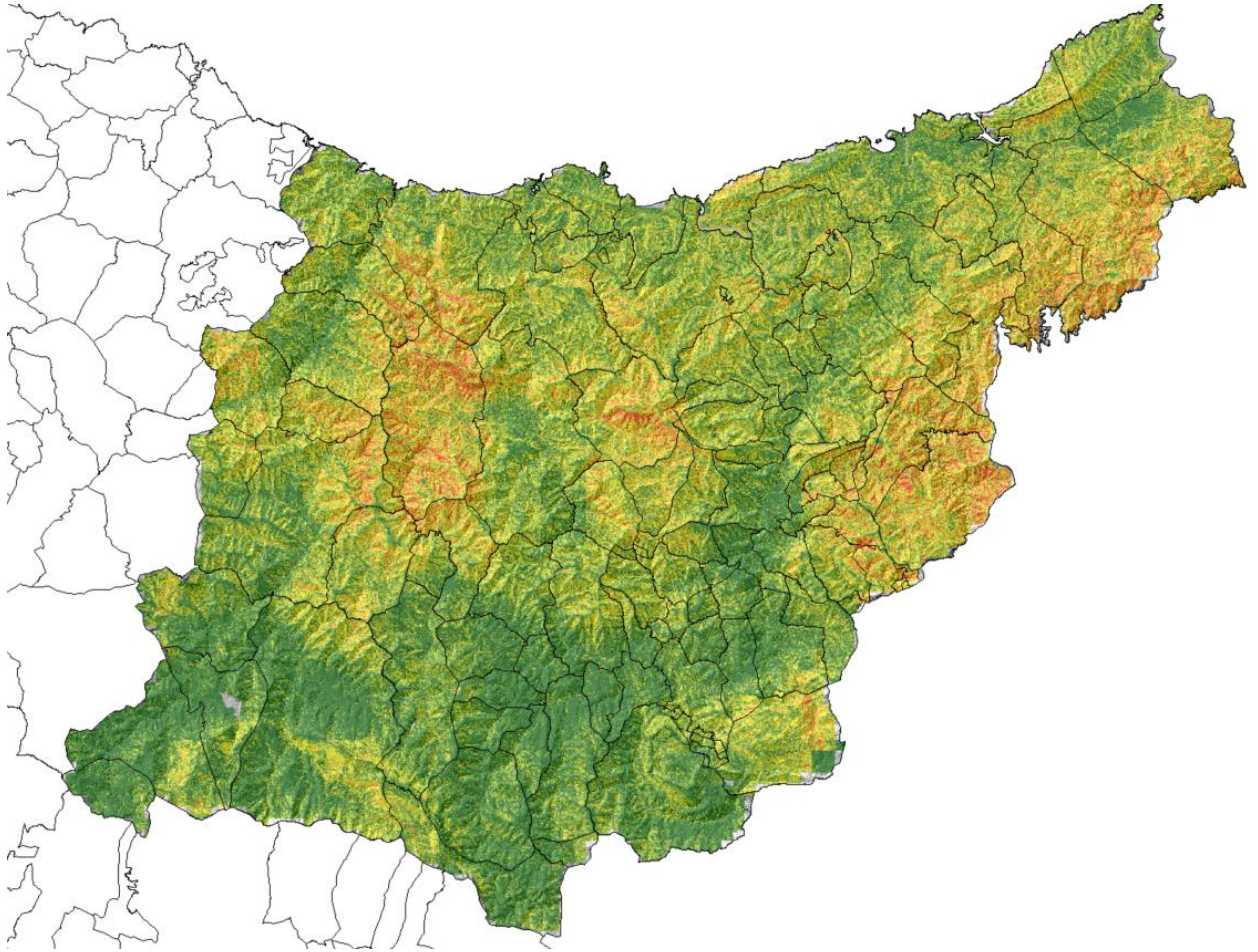


Figura 29. Mapa de peligrosidad frente a inestabilidades de tipo flujo del THG a escala 1/250.000, para el escenario 8.5 y proyección 2040-2070.

PROYECCIÓN CLIMÁTICA 2070-2100

Los resultados del mapa de peligrosidad para la última proyección, 2070-2100, en el escenario 4.5, parecen mostrar un retroceso en cuanto a la evolución que se venía marcando en periodos anteriores. Las zonas ocupadas por celdas de peligrosidad de moderada a muy alta disminuyen.

Siendo únicamente la intensidad de precipitación la que puede originar este retroceso (ya que el resto de factores son constantes en la ecuación), se deduce que en este periodo el SDII disminuye respecto del periodo anterior. El mapa es además en general, muy similar al del periodo 2010-2040.

Se produce una bajada evidente de la peligrosidad en las tres zonas principales descritas desde el periodo histórico; Macizo de Izarraitz al oeste, en la zona centro el Macizo de Ernio y al este el macizo de Cinco Villas, junto con los montes de los municipios de Berastegi y Elduain.

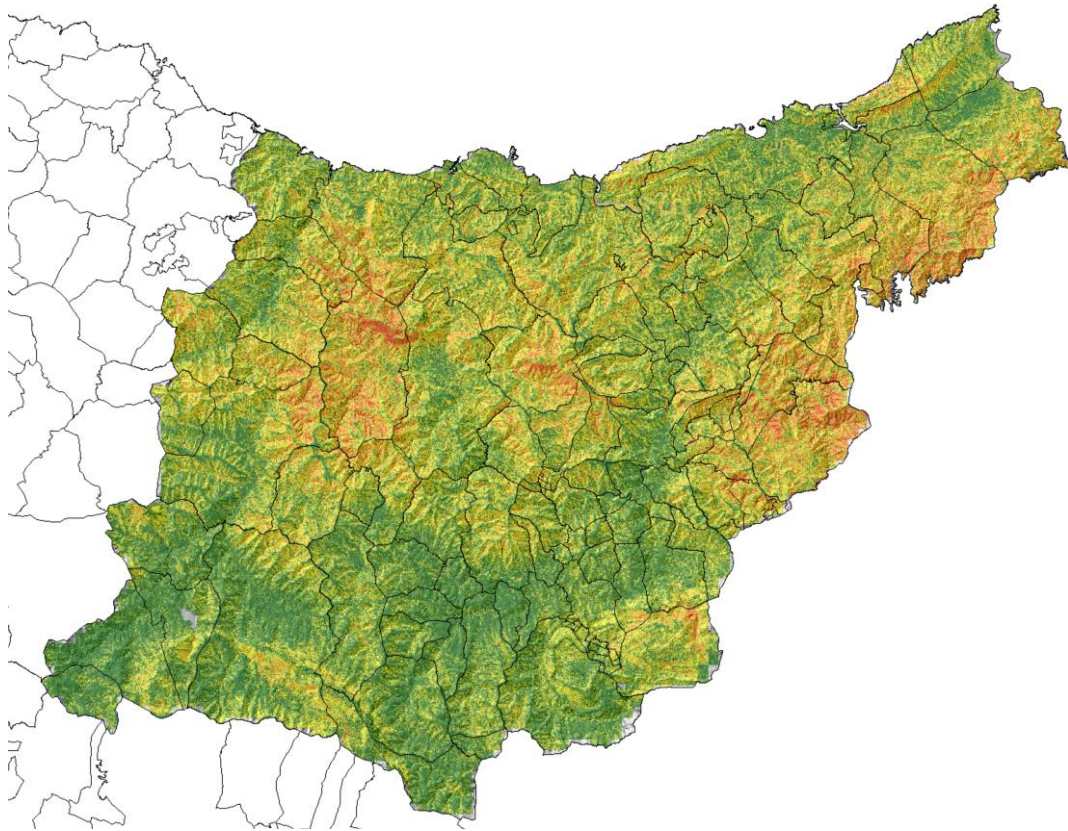


Figura 30. Mapa de peligrosidad frente a inestabilidades de tipo flujo del THG a escala 1/250.000, para el escenario 4.5 y proyección 2070-2100.

En el escenario 8.5 no se observa una evolución significativa respecto al periodo anterior, las zonas afectadas por peligrosidad moderada a muy alta siguen siendo prácticamente las mismas en cuanto a superficie y ubicación.

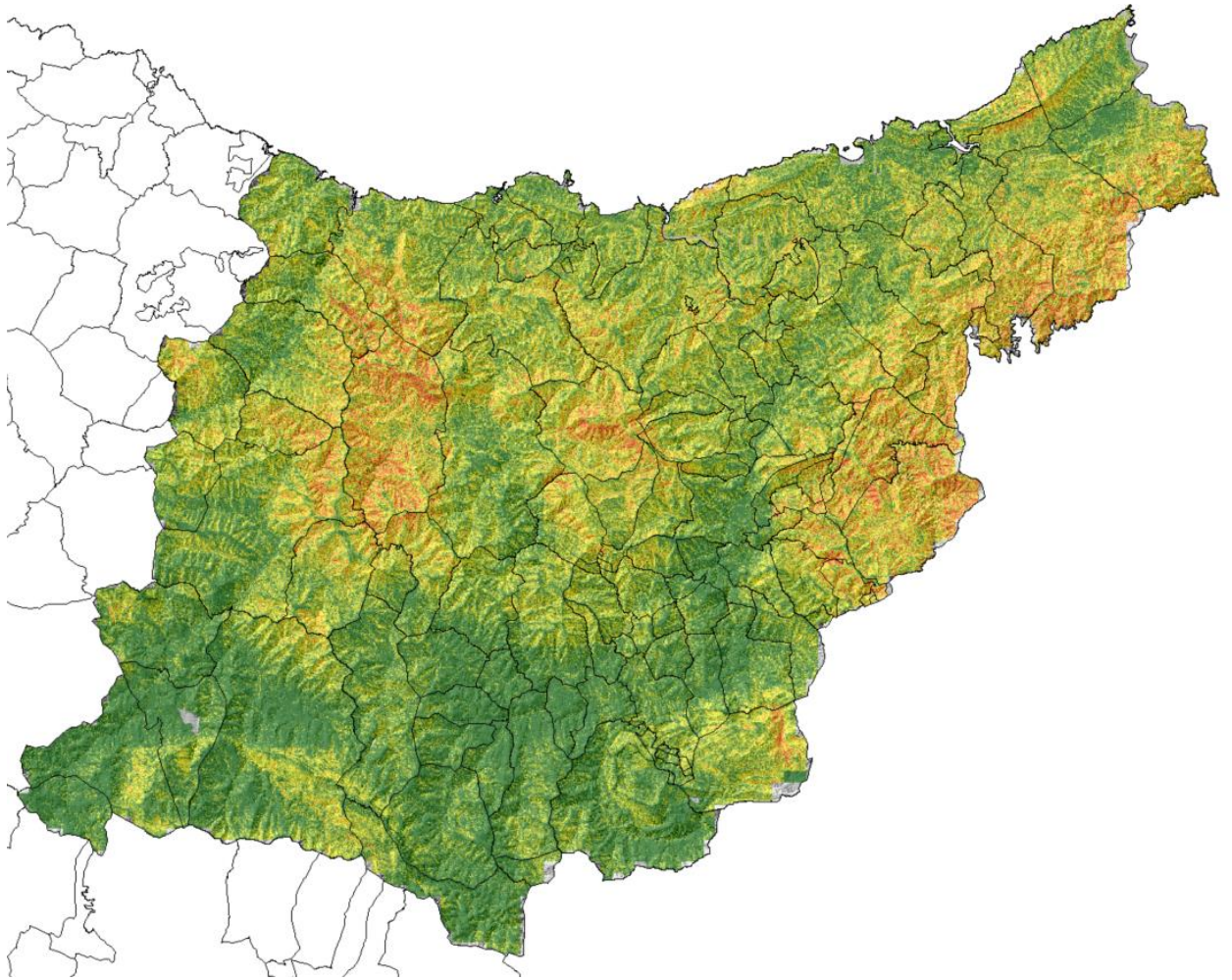


Figura 31. Mapa de peligrosidad frente a inestabilidades de tipo flujo del THG a escala 1/250.000, para el escenario 8.5 y proyección 2070-2100.

9.2.2 MAPAS DE PELIGROSIDAD FRENTE A DESLIZAMIENTOS EN MASA

PERIODO HISTÓRICO 1971-2015

En el mapa de peligrosidad para deslizamientos en masa, en el periodo histórico, se observa que la mayoría del territorio se encuentra en rangos de peligrosidad de baja a moderada.

Se muestra la coincidencia de las zonas que se encuentran en peligrosidad moderada a muy alta para inestabilidades de tipo flujos, con las que recoge el mapa de peligrosidad de deslizamientos en masa, estas son:

- Macizo de Izarraitz, zona de Irukurutzeta (límite municipios de Bergara, Soraluze y Azkoitia).
- En la zona central del THG el Macizo de Ernio.
- Macizo de las Cinco Villas al norte, continuando hacia el sur con las zonas montañosas de Berastegi y Elduain.

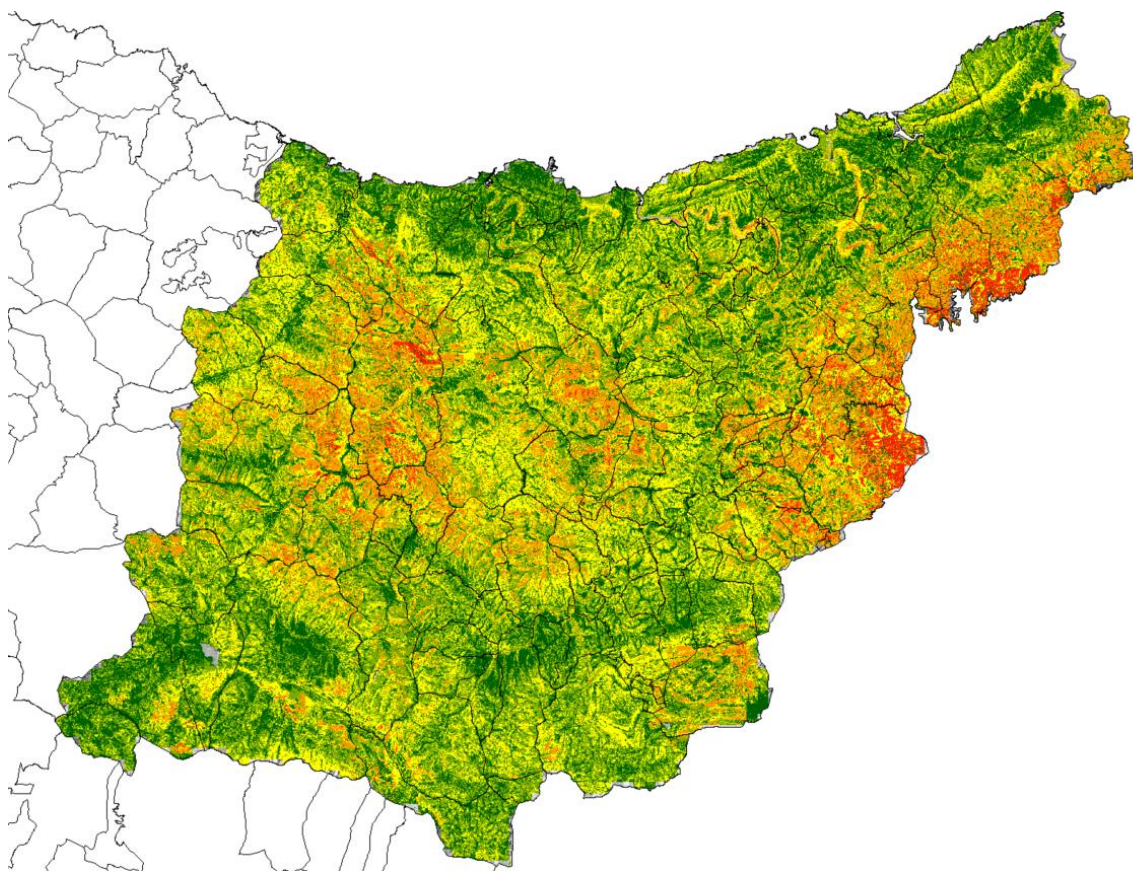


Figura 32. Mapa de peligrosidad frente deslizamientos en masa en el THG a escala 1/250.000, periodo histórico.

Por otra parte, se observan zonas, en especial la franja costera, así como el sur de la comarca del Alto Deba y la Zona central del Goierri, con una peligrosidad de muy baja a baja en general, para este periodo.

PROYECCIÓN CLIMÁTICA 2010-2040

En el escenario 4.5, las zonas con peligrosidad de muy baja a baja aumentan en este periodo, sin embargo, en las 3 áreas indicadas en el apartado anterior (Macizo Izarraitz, Macizo Ernio y el extremo este de la provincia, con el macizo de Cinco Villas y las zonas montañosas de Berastegi y Elduain), muestran un incremento de la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en masa. Se puede observar cómo zonas que se encontraban en peligrosidad moderada pasan a alta y muy alta.

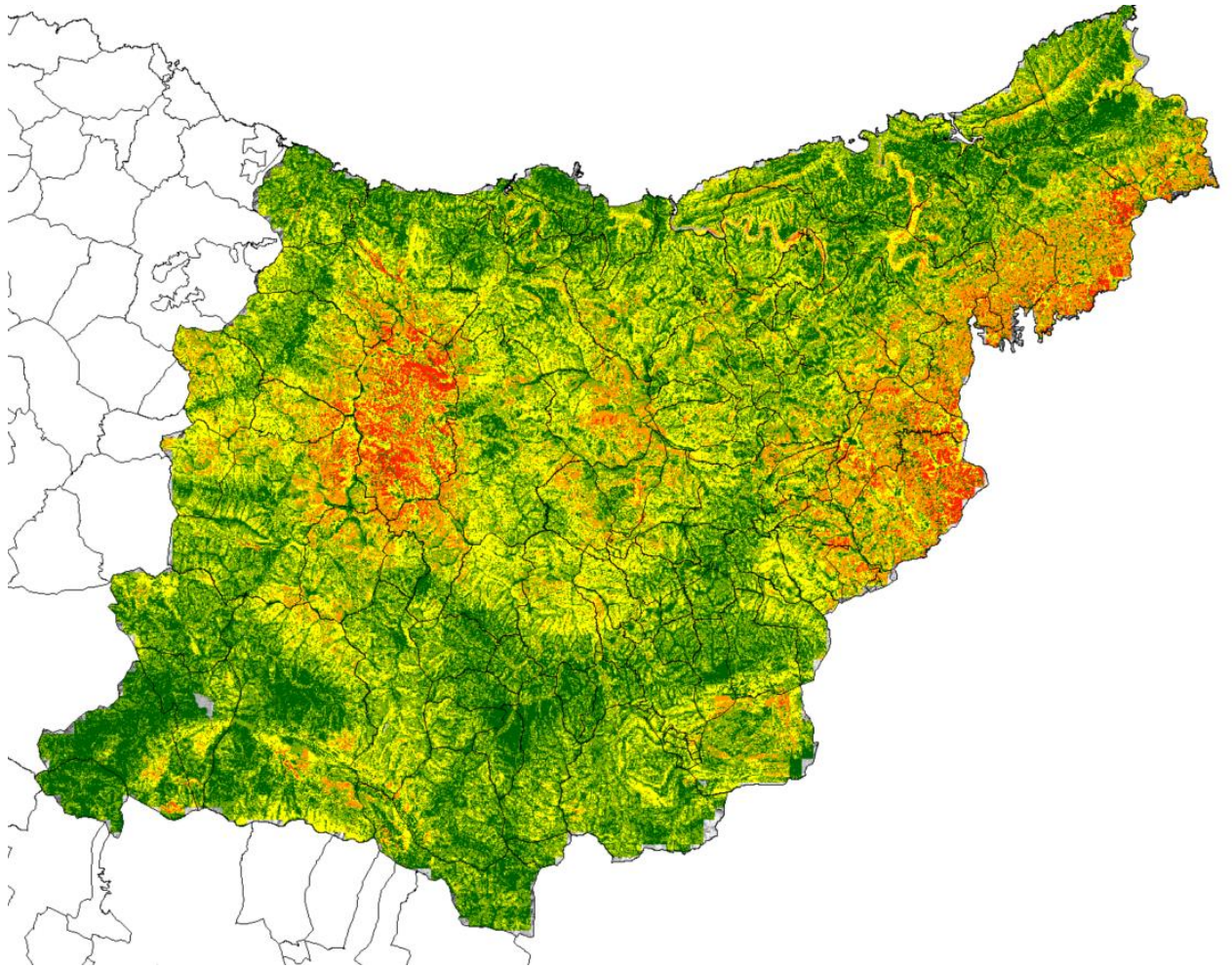


Figura 33. Mapa de peligrosidad frente deslizamientos en masa en el THG a escala 1/250.000, para el escenario 4.5, en la proyección climática correspondiente a 2010-2040.

Para el escenario 8.5, las zonas con peligrosidad muy alta aumentan respecto al periodo histórico. Estas zonas se localizan en las áreas ya mencionadas (la zona central de la provincia).

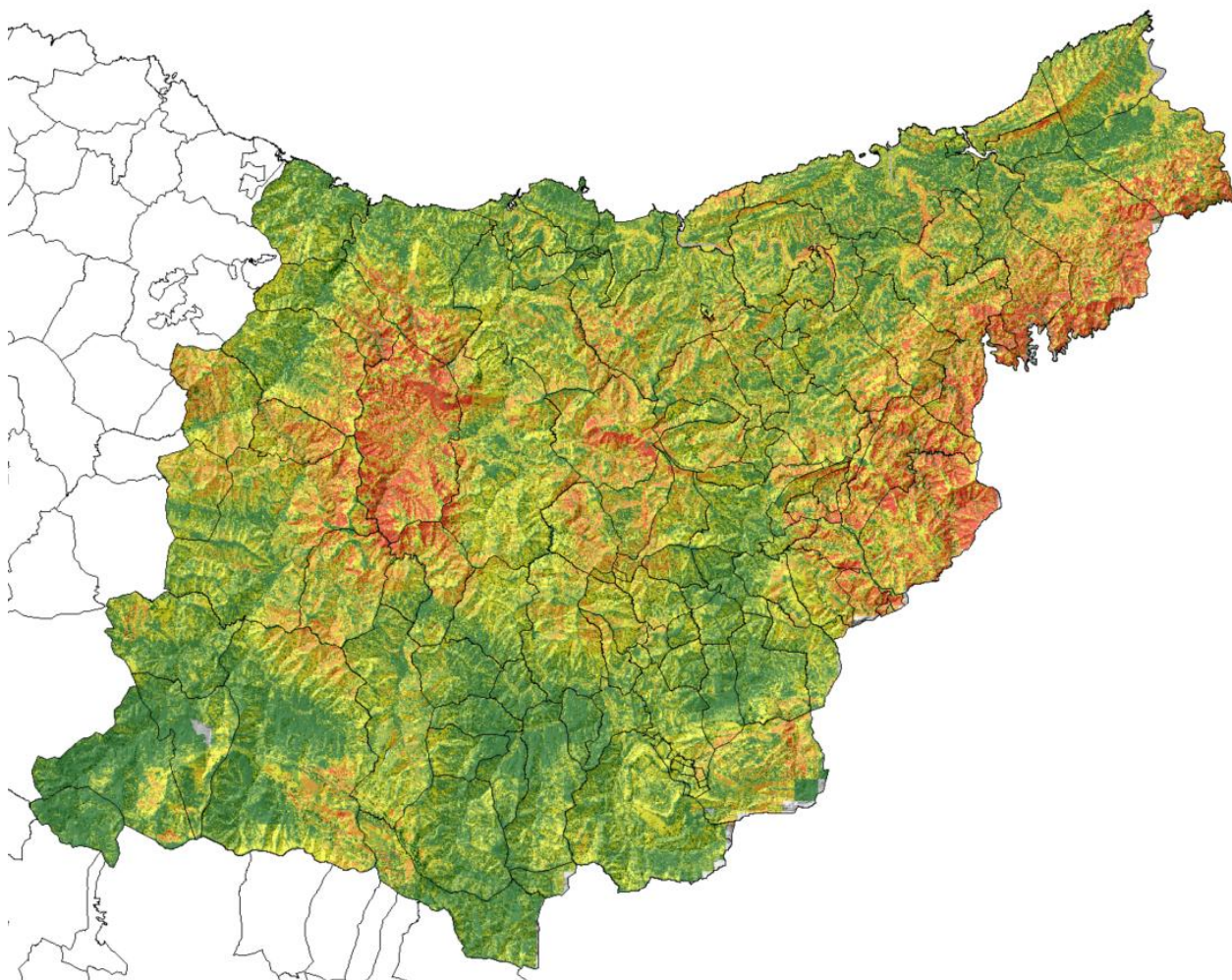


Figura 34. Mapa de peligrosidad frente deslizamientos en masa en el THG a escala 1/250.000, para el escenario 8.5, en la proyección climática correspondiente a 2010-2040.

PROYECCIÓN CLIMÁTICA 2040-2070

Continúa la tendencia marcada entre los periodos temporales anteriores, siguen aumentando las zonas con peligrosidad de muy baja a baja, mientras que, en las tres áreas mencionadas, se incrementan las celdas con peligrosidad de alta a muy alta.

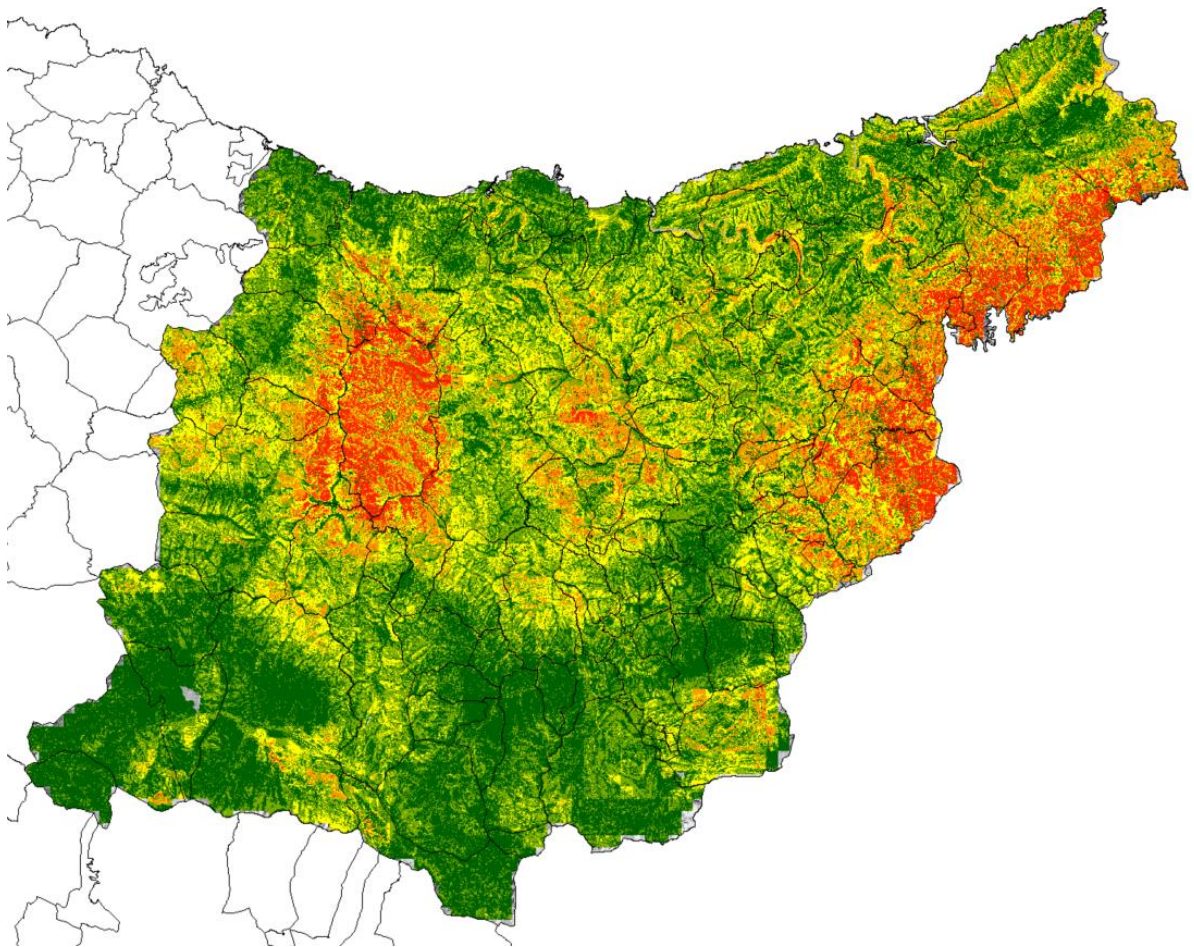


Figura 35. Mapa de peligrosidad frente deslizamientos en masa en el THG a escala 1/250.000, para el escenario 4.5, en la proyección climática correspondiente a 2040-2070.

En el escenario 8.5 se amplían levemente las zonas de peligrosidad muy alta (vuelve a darse en las zonas montañosas centrales de la provincia).

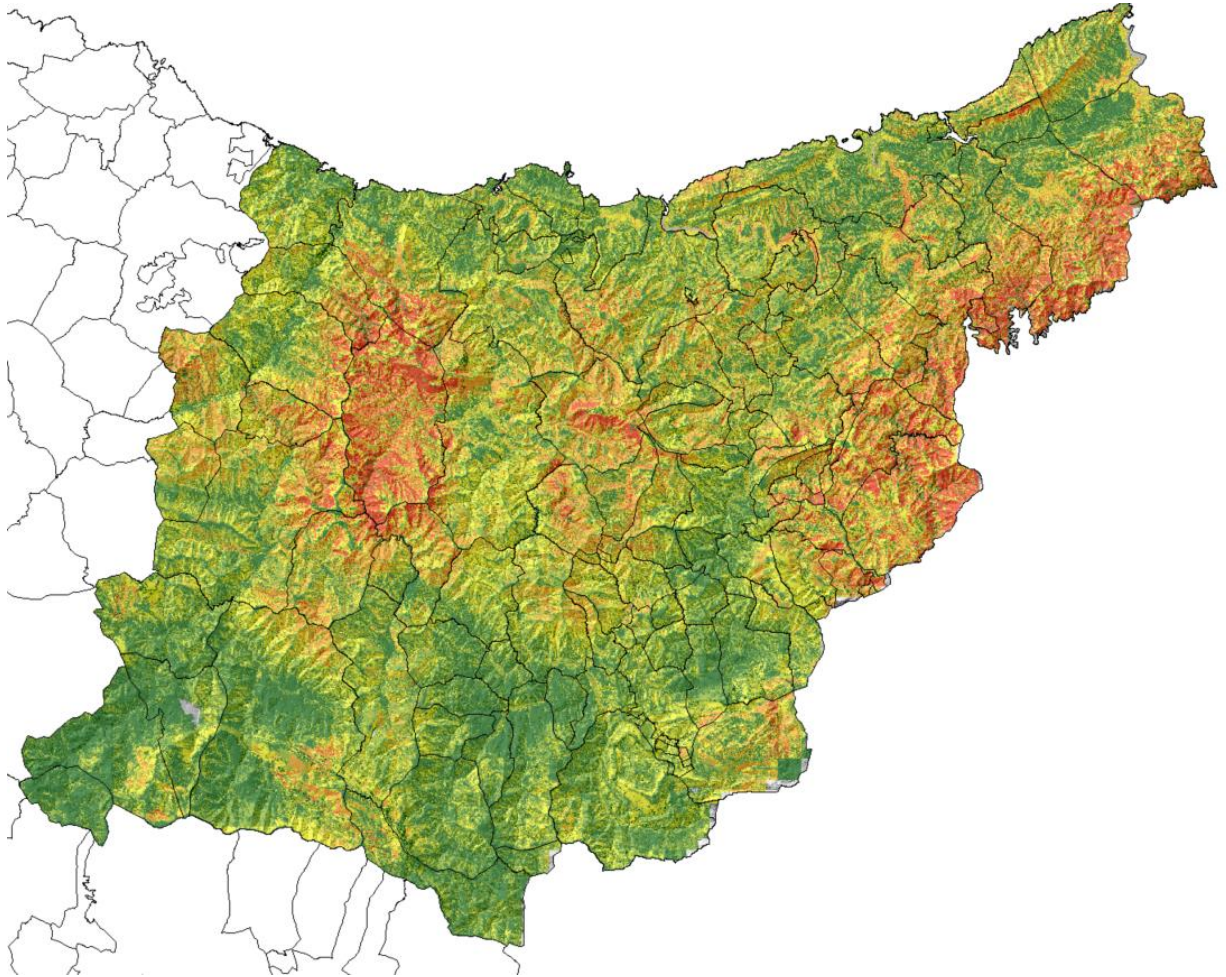


Figura 36. Mapa de peligrosidad frente deslizamientos en masa en el THG a escala 1/250.000, para el escenario 8.5, en la proyección climática correspondiente a 2040-2070.

PROYECCIÓN CLIMÁTICA 2070-2100

El resultado de la peligrosidad en este rango temporal es a grandes rasgos muy parecido al anterior. Se observa eso sí, un aumento general de carácter leve en todo el territorio de las zonas con peligrosidad moderada.

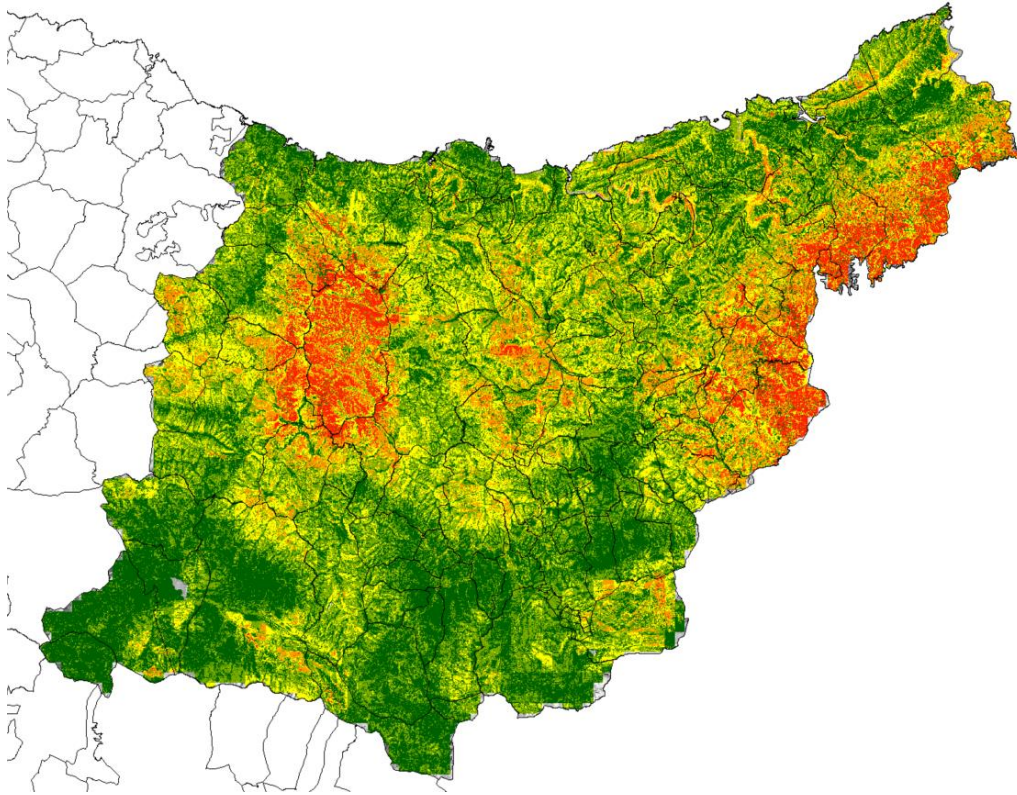


Figura 37. Mapa de peligrosidad frente deslizamientos en masa en el THG a escala 1/250.000, para el escenario 4.5, en la proyección climática correspondiente a 2070-2100.

Del análisis del escenario 8.5, se observa que la evolución de este periodo no muestra variaciones destacables respecto del anterior.

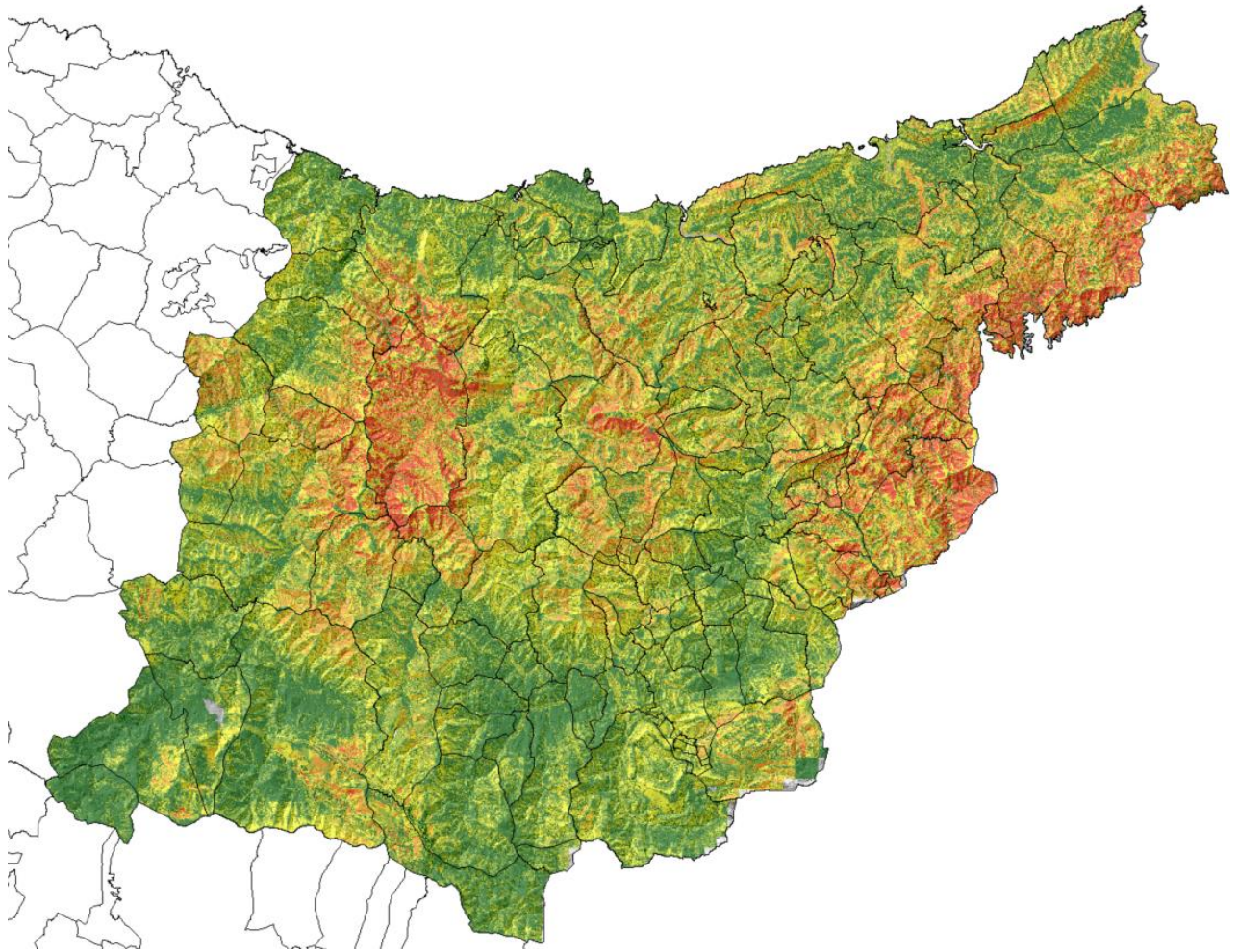


Figura 38. Mapa de peligrosidad frente deslizamientos en masa en el THG a escala 1/250.000, para el escenario 8.5, en la proyección climática correspondiente a 2070-2100.

9.3 COMPARACIÓN DE TENDENCIAS EN ESCENARIOS 4.5 Y 8.5 PARA AMBOS TIPOS DE DESLIZAMIENTOS.

9.3.1 EVOLUCIÓN DE LAS PROYECCIONES TEMPORALES PARA EL ESCENARIO 4.5

Del análisis realizado para cada tipo de inestabilidad en cada periodo temporal del escenario 4.5, se pueden sacar varias conclusiones a nivel del THG:

- Si bien el territorio en general, presenta una susceptibilidad moderada para ambos tipos de deslizamientos, los modelos realizados por KLIMATEK enfocan la probabilidad de ocurrencia, peligrosidad, a la franja central del territorio, desde la zona norte de la comarca del Alto Deba al oeste, hacia el límite con Navarra al este. La evolución desde el periodo histórico a las proyecciones temporales así lo muestra. En esta franja se sitúan los sistemas montañosos situados en la zona central del THG, en especial, el Macizo de Izarraitz, Macizo de Ernio, Macizo de las Cinco Villas y montes situados en los municipios de Berastegi y Elduain.

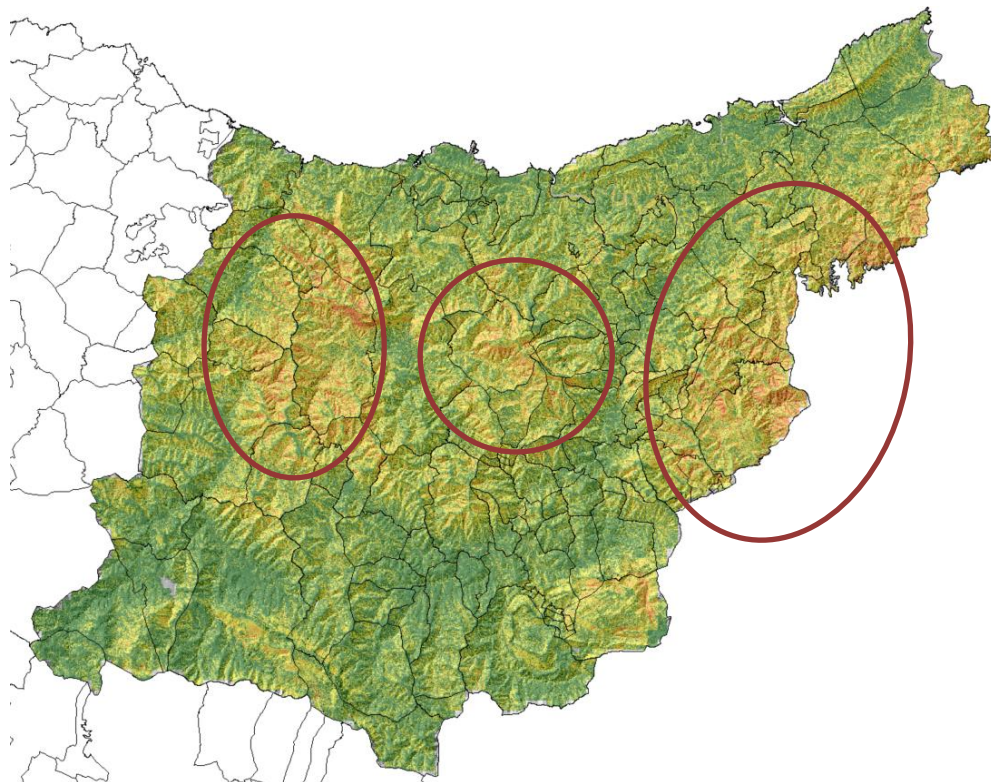


Figura 39. Mapa de peligrosidad frente deslizamientos tipo flujo en el periodo histórico.

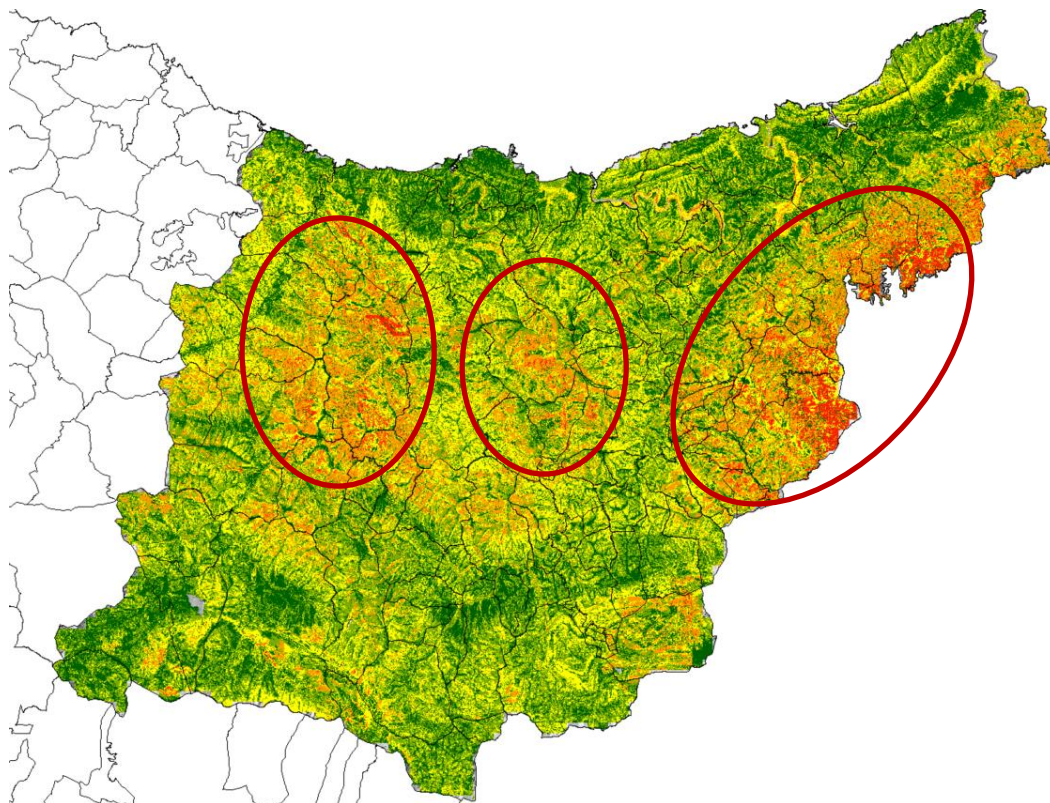


Figura 40. Mapa de peligrosidad frente deslizamientos en masa en el periodo histórico.

- La peligrosidad evoluciona de una forma completamente distinta para cada tipo de inestabilidad. Como conclusión general **aumenta la probabilidad de sufrir inestabilidades tipo flujo en amplias zonas del territorio, y disminuye la peligrosidad para deslizamientos en masa en general**, excepto en zonas montañosas de la franja central, donde aumenta. A continuación, se desarrollan estas conclusiones:
 - Inestabilidades de tipo flujo. En el periodo histórico, la zona con peligrosidad moderada a alta se concentra en las zonas montañosas del centro del territorio, en las proyecciones históricas de 2010-2040 y 2040-2070, estas zonas se van ampliando, de una forma irradiada respecto de

las tres áreas principales. En la proyección de 2070-2100 se observa un retroceso, generándose un mapa muy similar al resultado de 2010-2040.

- Deslizamientos en masa. Se observa que se incrementa la peligrosidad en las zonas montañosas de la franja central del territorio, mientras que el resto disminuye significativamente el riesgo de este tipo de inestabilidades.

9.3.2 EVOLUCIÓN DE LAS PROYECCIONES TEMPORALES PARA EL ESCENARIO 8.5

Para los deslizamientos de **tipo flujo** se observa un **incremento de las zonas con peligrosidad moderada para la proyección 2011-2040**, a partir de este periodo se produce una **disminución** de la peligrosidad en todo el territorio en general, más evidente en la mitad sur. Las zonas de mayor peligrosidad son las situadas en las áreas montañosas centrales de la provincia.

La evolución para los **deslizamientos en masa**, del periodo histórico a la **proyección 2011-2040**, es **llamativa principalmente en el Macizo de Izarraitz y en el de Cinco Villas** por el aumento de la peligrosidad. En el **resto de la provincia la peligrosidad general disminuye**, sobre todo en la mitad sur.

La evolución de este escenario marca una tendencia parecida para ambos tipos de deslizamientos, concentrándose la peligrosidad en los macizos montañosos centrales, y disminuyendo en el resto de la provincia. Esta evolución está marcada por el factor desencadenante, las precipitaciones, que se concentran en este escenario en las zonas montañosas tanto en intensidad como en acumulados.

10.RECOMENDACIONES DERIVADAS DEL ANÁLISIS TERRITORIAL REALIZADO

Del análisis realizado se desprenden una serie de conclusiones básicas. Por un lado, que las inestabilidades se incrementarán en las zonas donde se localizan los macizos montañosos, efecto principalmente de la acumulación de las precipitaciones en cuantía e intensidad.

Las inestabilidades que presentarán mayor incremento en el territorio en general en el escenario 4.5 son las asociadas a los denominados flujos de barro y detritos (debris flow) frente a las inestabilidades de tipo movimiento en masa. Para el escenario 8.5 la probabilidad de deslizamientos en masa y flujos se concentra en la zona central del territorio.

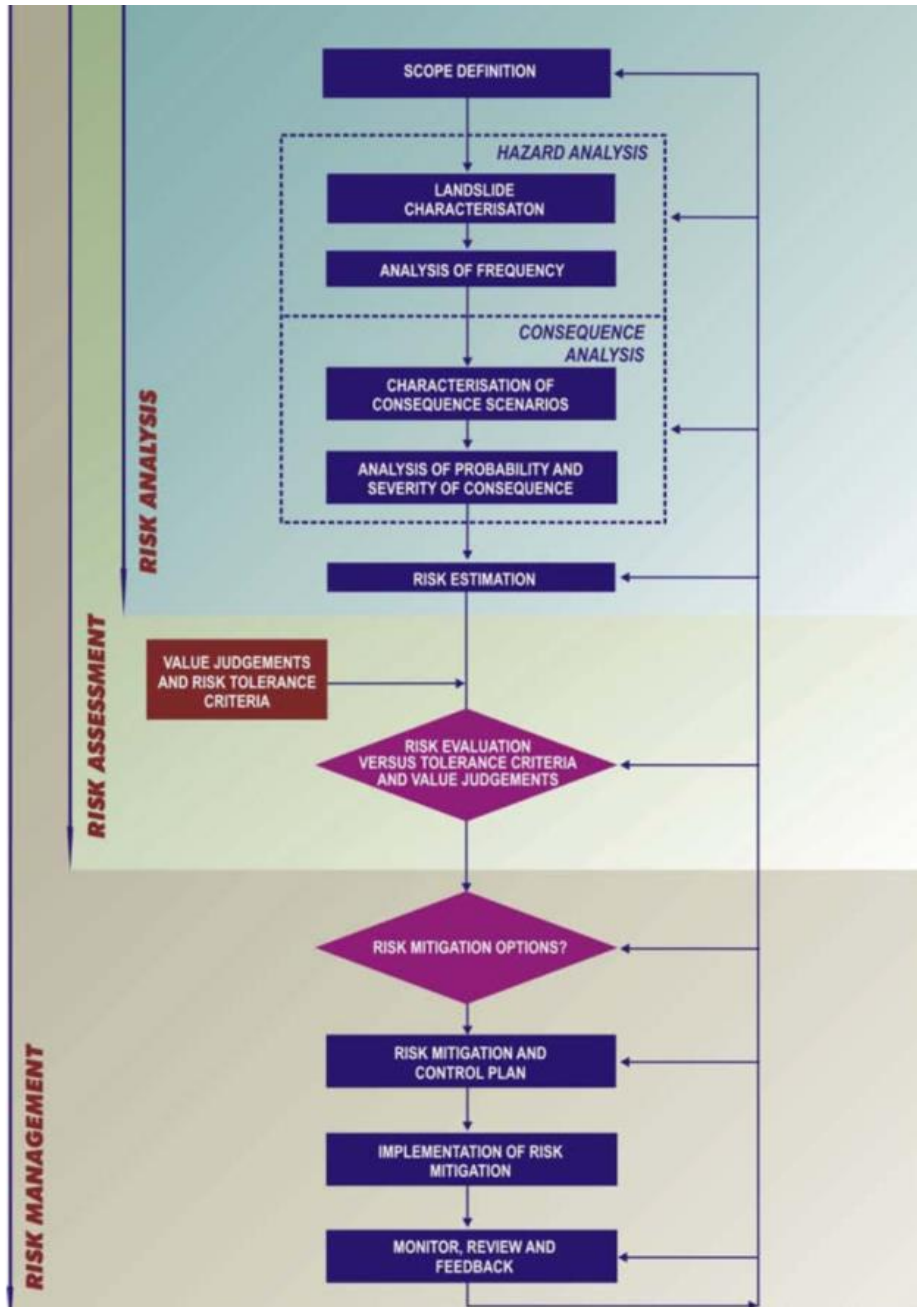
La gestión o mitigación del “riesgo” se debe realizar en base a los siguientes aspectos:

- Aceptar el riesgo: implica las situaciones en las que las dimensiones o características del proceso hacen inaceptable otra opción.
- Evitar el riesgo: mediante la eliminación de los elementos que son susceptibles de ser afectados por el proceso.
- Reducción de la frecuencia de los procesos: mediante la actuación sobre los factores determinantes con técnicas de estabilización o actuación sobre los factores desencadenantes (drenajes específicos etc...).
- Reducción de las consecuencias: este aspecto engloba principalmente la mitigación del efecto del proceso desencadenado. Incluye aspectos como la ejecución o colocación de elementos de defensa frente a los impactos, técnicas de alertas tempranas, planes de gestión, planes de inspección y protocolos de emergencias...

Con esta situación las recomendaciones a realizar son las siguientes:

- Análisis de la ordenación del territorio, en referencia a la alta susceptibilidad que presenta el mismo a sufrir inestabilidades de flujos de barro asociados a zonas de vaguadas y/o zonas de cauces con fuertes pendientes o pendientes moderadas.
- Una vez realizado el análisis de Vulnerabilidad, se recomienda el análisis del territorio a escala 1/5000 o mayor, con el objeto de analizar los efectos de las inestabilidades frente a los deslizamientos ocurridos, análisis de trayectorias, comportamiento de las infraestructuras, etc...

- Cualquier proyecto o planteamiento de desarrollo del territorio de elementos con alta vulnerabilidad, o el análisis de zonas con inestabilidades de carácter recurrente se ha de realizar mediante un estudio de detalle del Riesgo Geológico, siguiendo el siguiente planteamiento metodológico.



Cuadro 8. Planteamiento metodológico del tratamiento del riesgo (análisis, evaluación y tratamiento del riesgo).

- El territorio de Gipuzkoa se encuentra fuertemente humanizado en las zonas de valles de cauces principales y cuencas de tributarios de diferente orden. Distintas infraestructuras de comunicación, carreteras, autovías, autopistas y líneas de ferrocarril discurren por zonas dónde se ha definido una alta susceptibilidad. Por ello se recomienda que en zonas de mayor interés se realicen análisis específicos, de carácter determinístico a escala 1/1000, dónde se definan con mayor exactitud los procesos de inestabilidad que se puedan originar. Sucede lo mismo en núcleos urbanos con infraestructuras o equipamientos de interés general.
- Finalmente, se recomienda que a la hora del diseño geotécnicos y de sistemas de drenaje se tengan en cuenta períodos de retorno adecuados a la zona de análisis, profundizando sobre las recomendaciones generales de diseño. Para estructuras de contención, excavaciones con taludes definitivos, etc... se recomienda que los análisis geotécnicos tengan en cuenta aspectos de saturación y drenaje específicos para cada zona.

11. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS

En diferentes puntos del documento se ha hecho referencia a las dificultades y retos que se han tenido a la hora de desarrollar los trabajos, incluyendo el planteamiento metodológico. En resumen, diremos que la inexistencia de un Inventario de Deslizamientos ha condicionado de manera determinante el planteamiento metodológico. Por otro lado, el algoritmo de análisis utilizado presenta una serie de limitaciones que se deberían de solventar. Así mismo los aspectos referentes al análisis del Riesgo han quedado relegados por la imposibilidad de obtener datos de Vulnerabilidad de los elementos susceptibles de ser afectados por los procesos de inestabilidad. Por todo ello, a continuación, se incluyen una serie de conceptos o líneas de trabajo que a nuestro parecer se deberían de desarrollar para mejorar el trabajo realizado y poder progresar en el análisis de riesgo. Son los siguientes:

- Se precisa de la realización de un Inventario de deslizamientos de la provincia. Esta información aportará datos adecuados para realizar un análisis estadístico, que aporte información correcta para ponderar adecuadamente los pesos e los Factores de análisis y a su vez ponderar los valores de las clases dentro de cada factor. En el anejo 2 se recogen tablas dónde se muestra a modo de ejemplo la información que podría reflejarse para cada inestabilidad reflejada en el Inventario.
- Mediante la constitución de un equipo multidisciplinar de expertos, se debería desarrollar un mapa de Susceptibilidad del territorio incorporando las diferentes variables que constituyen este concepto.
- Desde el punto de vista de los Modelos Climáticos, sería conveniente desarrollar modelos de comportamiento o de predicción con una escala de resolución mayor que la que actualmente se posee (cuadrícula de 1Kmx1km). Este aspecto proporcionaría mayor capacidad de detalle en los análisis a realizar.
- Por otro lado, es de interés el desarrollo de una cartografía de detalle del espesor de suelos, ya que es este tipo de litotipo el que genera los deslizamientos de mayor recurrencia. Este trabajo se podría realizar analizando la información satelital.
- Se debería sustituir el motor de análisis constituido por un algoritmo polinómico por un motor basado en Redes Neuronales. De esta manera y con una administración adecuada de la información del Inventario de Deslizamientos se mejoraría significativamente los resultados.

12.BIBLIOGRAFÍA

- Proyecto Klimatek 2016. Elaboración de escenarios regionales de cambio climático de alta resolución sobre el País Vasco. IHOBE. Gobierno Vasco.
- Mapping: Inventories, Susceptibility, Hazard and Risk. Javier Hervás – Peter Bobrowsky. 2009.
- Deslizamientos. Análisis y Remediación. Enero 2009.
- Ingeniería geológica. Gonzalez de Vallejo. 2002.
- Debris Flow. Mechanics, Prediction and Countermeasurements. Tamotsu Takahashi. 2014.
- Elaboración y validación de mapas de susceptibilidad de deslizamientos mediante técnicas de análisis espacial. Tesis doctoral- Juan Remondo Tejerina. 2001.
- Análisis de la peligrosidad frente a deslizamientos de ladera, en la cuenca de Loja (Ecuador). Tesis doctoral John Egverto Soto Luzuariaga. Universidad de Granada-España. 2018
- Methodological Approach Landslide Analysis in a Regional Scale. Txomin Bornaetxea Estela. Data collection, susceptibility models and precipitation thresholds. Application in Gipuzkoa province (Basque Country). UPV 2018.
- Proceso analítico jerárquico para seleccionar métodos de manejo forestal en Durango. Fernando Pérez-Rodríguez, Benedicto Vargas-Larreta, Oscar Alberto Aguirre-Calderón, José Javier Corral-Rivas y Alberto Rojo-Alboreca. 2012.
- Toma de decisiones multicriterio. Aplicación del proceso analítico jerárquico a caso real. Itxaso Gimón Polo. UPV. 2018.

- Application of analytical hierarchy process (AHP) for Landslide Susceptibility Mapping: A study from southern Western Ghats, Kerala, India. Achu A.L and Rajesh Reghunath.
- Pan-european Landslide susceptibility mapping; ELSUS versión 2. Martina Wilde, Andreas Günther, Paola Reichenbach, Jean-Philippe Malet and Javier Hervás. 2018.
- Guidelines for Mapping Areas at Risk of Landslides in Europe. Javier Hervás. 2007.
- Guideline for landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning. Extract from Australian Geomechanics. 2007.
- Landslide inventories in Europe and policy recommendations for their interoperability and harmonisation. A JRC contribution to the EU-FP7 SafeLand Project. Miet Van Den Eeckhaut and Javier Hervás. 2012.
- Update of Risk Data Hub software and data architecture Software solutions for Disaster Risk Management. Antofie, T., Luoni, S., Eklund, L, G., Montserrat, M, F. European Commission. 2020.
- The IMIRILAND methodology: a proposal for a multidisciplinary risk assessment procedure with respect to large landslides. Marta Castelli, Luca Paro, Claudio Scavia. 2004.

En Miñano a 04/02/2022



Fdo: Hasier Cueva Artola

Geólogo UPV-EHU

Master en Ingeniería Geológica UCM

Colegiado nº: 3309



Fdo: Melania Alfonso Molina

Geóloga UGR

Master en Ingeniería Geológica UGR

Colegiado nº: 7127

ANEJOS

ANEJO 1: FICHAS ÁREAS FUNCIONALES

ANEJO 2: FICHAS TIPO TOMA DE DATOS DESLIZAMIENTOS

Items	Check	Response: Yes, No, NA, NK	Comments/ Description (If used by the Regulator, then all except No answers require comment)
Site	Report Reference and date		
	Client's name		
	Site address		
	Date of site visit. Site visit by (name)		
	Weather conditions on date of visit		
Development	Will the proposed development have a degree of use or occupation by humans?		
	Does the development involve significant modification to the landscape, including cut and fill?		
	What is the landslide susceptibility classification for this slope/site? (Assuming the regulator has completed such zoning studies in accordance with AGS 2007a)		
	What is the landslide hazard or risk classification for this? (as above)		
Geology	What is the regional geology according to published maps?		
	Is the site located on surface fill or colluvium?		
	Has the geology been confirmed by inspection or investigation? If not – why not. If Yes – provide basis for confirmation.		
Geomorphology	Are there any indications of possible instability on the site or adjacent to it?		
	Does the site have distinct breaks in slope or benches?		
	Are there terracettes or other signs of creep on the site?		
	Are there signs of tunnel erosion, such as sinkholes or collapse of soils on the site?		
	Are there any tension cracks in the ground surface of the site?		
Adjacent Sites	Do adjacent sites show signs of slope instability as described above?		
	Do adjacent sites have non-retained cuts or fills close to boundaries?		
	Are there steep slopes, different geology or landforms on adjacent sites that may pose a threat to this site?		
	Will the proposed development threaten the stability of adjacent developments via cuts, fill or drainage?		
Slope	What is the overall (natural) slope of the site?		
	Are there changes (breaks) in the slope? Are these man made or natural?		
	What is the maximum slope of the site?		
	Is the slope in an area of development different to elsewhere (large sites)?		
Drainage	Does the site have deeply dissected drainage courses?		
	Is the site likely to receive significant surface water runoff from other sites upslope?		
	Does the site have dams, lakes, ponds, swamps, bogs, seeps or soaks?		
	Does the site receive drainage from road culverts or spoon drains?		
	Will any aspect of the development significantly modify the existing site drainage?		

Items	Check	Response: Yes, No, NA, NK	Comments/ Description (If used by the Regulator, then all except No answers require comment)
Erosion	Are there any severe forms of erosion including tunnels or gullies on the site?		
	Do any existing cuts and fills show signs of erosion including loss of vegetative cover?		
	Do access tracks show erosion, scouring or signs of uncontrolled runoff?		
	Will the development have the potential to change the current conditions?		
Site Cuts and Fills	Are there existing cuts and/or fill areas on the site?		<i>(If Yes, attach site sketch showing location, extent, height and batter angles)</i>
	Are there any existing unsupported cuts or fills that exceed 1.0m in vertical height from toe to crest?		
	Are batter angles steeper than 1V:2H (or 26 degrees or 50%) for any existing cut or fill in soil materials?		
	Are batter angles steeper than 1V:1H (or 45 degrees or 100%) for any existing cut in rock?		
	Do existing cuts and fills have adequate surface or subsurface drainage? Provide details.		
	Were vegetation and topsoil removed prior to filling? If No, provide details.		
	Have suitable fill materials been used and have they been properly compacted (with evidence thereof)?		
	Do any existing cuts and fills show seepage? If Yes, show details on site plan.		
Retaining Walls	Are there any existing retaining walls on the site?		<i>(If Yes, attach site sketch showing location, extent, height, type, condition and slope of batter above)</i>
	Are timber or dry rock retaining walls used for any purpose other than minor landscaping of vertical height less than 1.0m?		
	Do existing retaining walls supporting major cuts and fills appear to be unengineered?		
	Do existing retaining walls show signs of distress or movement? If Yes, provide details.		
	Do existing retaining walls have adequate drainage above and below the wall? If No, provide details.		
Groundwater	Are there discharge areas such as springs, seeps, bogs, swamps or constantly wet areas on the site or adjacent to the site?		<i>(If Yes, provide site sketch showing location and extent)</i>
	Are there bores intersecting a shallow watertable on the site?		
	Any other evidence of high groundwater levels?		
Rock	Is rock exposed on the site?		
	Do any exposed cuts have rock strata that are dipping out of the slope?		
	Do any exposed rock faces show open joints or loose boulders? If yes, provide site sketch plan and details.		
Soil Profile	Do exposed faces or existing excavations show soil profiles exceeding 1.5m vertical height?		
	Do exposed faces or existing excavations show a mixture of soil and rock, which may be landslide debris or colluvium?		
	Does the soil profile show inconsistent colouring or interbedded layers of differing materials?		

Items	Check	Response: Yes, No, NA, NK	Comments/ Description (If used by the Regulator, then all except No answers require comment)
	Does the exposed profile show imported materials or fill?		
	Is there significant evidence of yabby holes or other burrowings?		
Vegetation	Has the natural vegetation been substantially cleared from the site?		
	Does the proposed development involve significant clearing of the site?		
	Are any of the plants species on site indicators of waterlogging (eg. spiny rush, swamp gums)?		
	Is revegetation work required?		
	Do existing trees and shrubs show signs of slope instability, such as tilting or bent trunks?		
	Does any existing vegetation show signs of isolated dieback or distress?		
	Will the removal of any vegetation cause increased erosion and degradation to the adjacent area?		
Effluent and Stormwater Disposal	What type of effluent disposal system is currently used? If on site disposal, show discharge area on site plan.		
	Provide details of current discharge point for stormwater. Show location on site plan.		
	Does the geology or stability of the site suggest that septic system absorption trenches are unsuitable?		
	Are there any signs of increased waterlogging or impact from effluent of adjacent sites?		
	Is a new point/area for stormwater discharge proposed? If so, give details and show location (and extent if dispersed on site) on site plan.		
	Is a new on site effluent disposal system proposed? If Yes, give details and show proposed disposal area on site plan.		
Slope Classification	Have landslide hazards been identified and shown on relevant plan or section?		
	Has the risk to property been assessed and is the result in accordance with the acceptance criterion?		
	Has the risk to life been assessed and is the result in accordance with the acceptance criterion?		
	What is recommended to maintain or reduce the landslide risk at this site? Are detailed requirements given?		
OTHER COMMENTS			