



prospección
y geotecnia

**CONDICIONES DE ESTABILIDAD DE LA LADERA DERECHA
DEL EMBALSE DE YESA TRAS LAS ACTUACIONES
LLEVADAS A CABO PARA SU ESTABILIZACIÓN**



Enero de 2014

INDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA DE LA MARGEN DERECHA.....	3
3. PROCESOS DE INESTABILIDAD DE LA LADERA.....	15
3.1. Alcance del movimiento detectado.....	15
3.2. Actuaciones para la estabilidad de la ladera.....	36
4. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD.....	52
4.1. Introducción.....	52
4.2. Metodología de análisis.....	54
4.3. Modelos geométricos analizados.....	55
4.4. Parámetros de cálculo.....	61
4.5. Desarrollo de los análisis de estabilidad.....	65
4.5.1. Modelo geométrico 1: Perfil nº1.....	65
4.5.2. Modelo geométrico 2: Perfil nº2.....	71
4.5.3. Modelo geométrico 3: Perfil nº3.....	79
4.5.4. Modelo geométrico 5: Perfil nº5.....	85
4.6. Resultados de los análisis.....	93
4.7. Causas del proceso de inestabilidad.....	97
4.7.1. Discusión sobre el origen.....	97
4.7.2. Conclusiones.....	100
5. INCIDENCIA DE LOS FACTORES CONSIDERADOS EN LA SEGURIDAD DEL EMBALSE.....	101
6. SUFICIENCIA DE ESTUDIOS EN LA LADERA.....	103
7. CONCLUSIONES.....	105

1. INTRODUCCIÓN

En el presente informe técnico se presenta el resultado de los trabajos realizados para la evaluación de las condiciones de estabilidad de la ladera derecha en la cerrada del Embalse de Yesa, una vez llevadas a cabo la mayor parte de las actuaciones previstas para la mejora de sus condiciones de estabilidad.

Las actuaciones realizadas han consistido principalmente en la excavación de un volumen aproximado de 1,5 millones de metros cúbicos en la ladera, aguas arriba de las urbanizaciones Lasaitasuna y Mirador de Yesa, situadas sobre la carretera N-240. Como actuaciones complementarias, se están construyendo unos muros de hormigón en la parte baja de la ladera, sobre el estribo derecho de la presa actual y en el espacio entre las dos presas, que aportarán un peso estabilizador en el pie de la ladera haciéndola además impermeable.

Próximamente se construirá una pantalla de bentonita-cemento que impermeabilizará la ladera frente a las futuras oscilaciones del nivel del embalse, para la presa recrecida, aguas arriba de la presa actual. Para asegurar la estabilidad de la coronación de dicha pantalla, que discurre en parte por un talud afectado por el deslizamiento del Inglés, se construirá un muro anclado que al tiempo estabilizará la parte emergida de dicho deslizamiento.

En un trabajo anterior, presentado en julio de 2013, se definía el modelo geológico de la ladera en base al estudio de informes y trabajos previos, así como a la realización de estudios específicos de cartografía geológica, análisis estructural y estudio del alcance de los movimientos detectados en el terreno. También se definía el mecanismo de inestabilidad que afectaba a la ladera y el alcance del mismo, en base a los resultados de la auscultación y las observaciones de campo. Los análisis de estabilidad realizados en dicho estudio contribuyeron a la optimización de las actuaciones y al diseño de la excavación.

En el presente estudio se analiza el efecto estabilizador de las actuaciones realizadas, las que se encuentran en fase de ejecución y aquellas que se llevarán a cabo en el futuro, para los supuestos de embalse actual y embalse recrecido, condiciones normales, situaciones de desembalse, condiciones accidentales y extremas.

El modelo geológico empleado en los nuevos análisis de estabilidad se ha adaptado a lo observado durante el progreso de la excavación de la ladera, permitiendo una mayor aproximación a la realidad.

Los análisis de estabilidad realizados han permitido analizar la eficacia de las actuaciones realizadas y evaluar el riesgo que representa la ladera sobre la presa y embalse, tanto en la situación actual como en la situación de embalse recrecido.

En los análisis de estabilidad se estudian los tres movimientos de ladera que se observan en la ladera de la margen derecha de la presa de Yesa:

- Superficie Principal de Rotura (SPR). Se trata de un movimiento de ladera de tipo traslacional, que involucra a materiales de tipo Flysch, con un volumen de aproximadamente $4,5 \text{ hm}^3$ y una profundidad de plano de deslizamiento variable entre 10 m y 60 m. La superficie afectada es del orden de 155.000 m^2 . El desplazamiento máximo registrado es superior a 30 cm y su velocidad máxima ha sido de 41 mm/semana en el mes de febrero de 2013. En la actualidad, tras la excavación realizada no se detecta movimiento en los inclinómetros y las referencias topográficas registran movimientos del orden de 1 mm/mes.
- Superficie Inferior de Rotura (SIR): Es un movimiento traslacional que afecta a toda la serie de Flysch y prácticamente coincide con el contacto con las Margas de Pamplona infrayacentes. Su volumen se aproxima a los 12 hm^3 . Su movimiento es más lento que el anterior, siendo apenas perceptible por la instrumentación antes del tratamiento llevado a cabo. En la actualidad no se registra movimiento.
- Deslizamiento del Inglés o de Jiménez Salas: Se trata de un deslizamiento rotacional que tiene su origen, al menos, en 1960. Su volumen estimado es de $0,3-0,4 \text{ hm}^3$ y afecta exclusivamente a la zona situada aguas arriba de la presa actual, entre las cotas 550 y 445 m.s.n.m. aproximadamente. La velocidad máxima registrada es inferior a 5 mm/año. Los movimientos coinciden siempre con los desembalses. La escasa magnitud de los movimientos y su tamaño moderado ha permitido la convivencia con la explotación de la presa desde hace décadas.

También se evalúa la posibilidad de llevar a cabo mejoras al tratamiento efectuado, sobre todo en lo referente al movimiento de tierras, para incrementar más aún las condiciones de estabilidad de la ladera en el futuro.

2. DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA DE LA MARGEN DERECHA

El estudio de la margen derecha de la cerrada del embalse de Yesa permitió, en 2013, elaborar una cartografía geológica, contribuir a la reinterpretación del modelo geológico de la misma y evaluar el alcance de los movimientos del terreno detectados en la ladera.

La zona estudiada con mayor detalle fue un sector de unos 500 m de longitud en sentido Este-Oeste y unos 600 m en sentido Norte-Sur, dentro del cual se habían reconocido unos procesos de inestabilidad del terreno.

En total el área estudiada con detalle fue de unas 30 hectáreas (figuras 2.1 a 2.3).

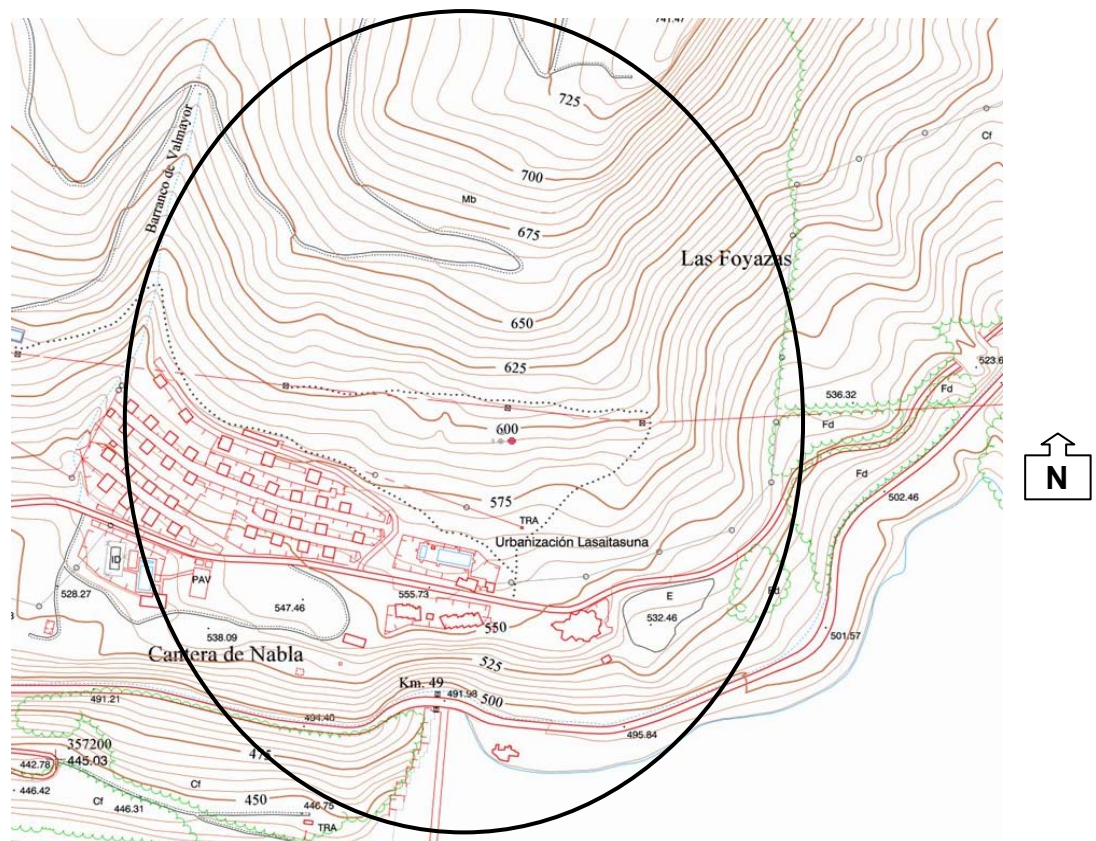


Figura 2.1: Vista de la zona de estudio sobre la base topográfica (Imagen tomada del visor Iberpix, del IGN).

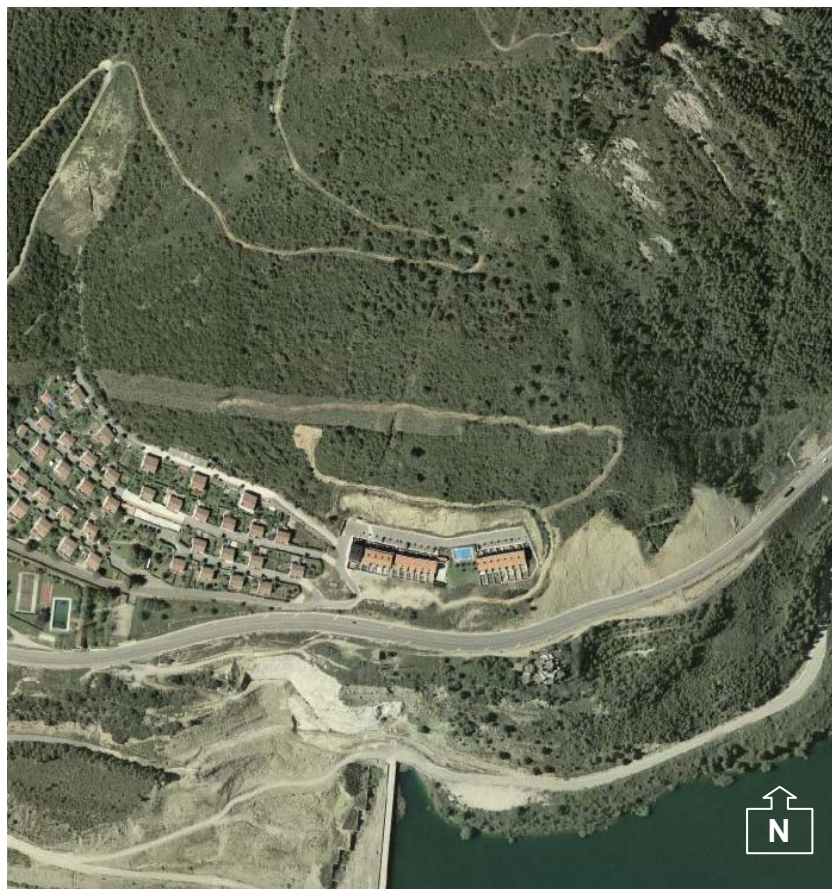


Figura 2.2: Ortofotografía de la ladera derecha de la cerrada del embalse de Yesa, donde se localiza la zona de estudio (imagen tomada del visor IDENA del Gobierno de Navarra).

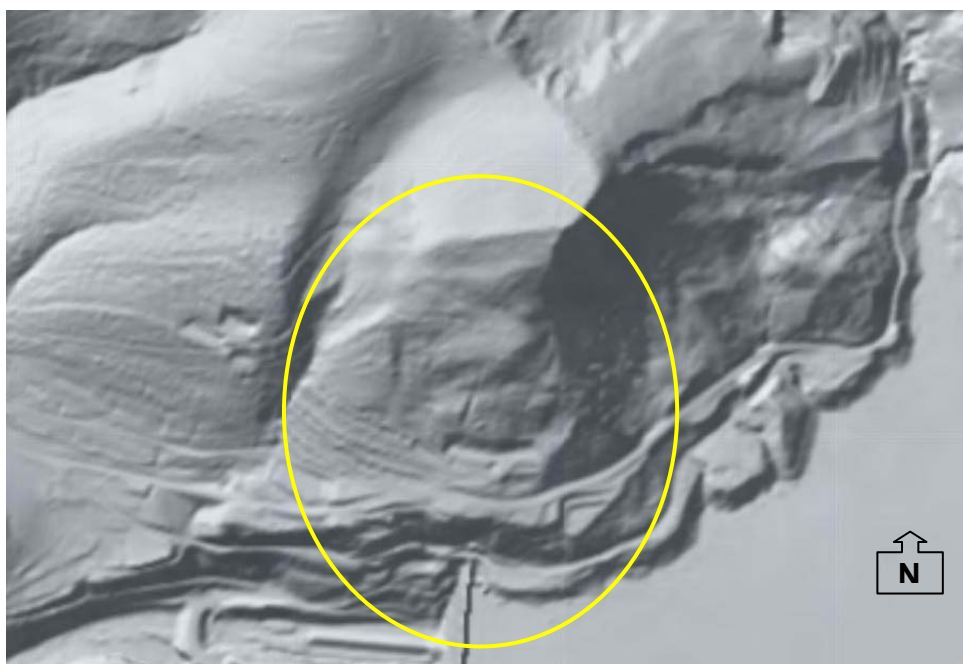


Figura 2.3: Modelo digital del terreno en el que se observa el alcance de la zona de estudio (Imagen tomada del visor Iberpix, del IGN).

Las litologías presentes en la zona de estudio son las que se exponían en el documento elaborado en 2013: un potente sustrato de Margas de Arguís-Pamplona al que se superpone un recubrimiento de hasta 100 m de espesor de una alternancia de areniscas y margas conocida como Flysch de Yesa.

En superficie aparecen diversos recubrimientos de pequeño espesor, destacando depósitos coluviales al pie de la ladera y antiguos deslizamientos en la parte superior de la misma, que provocan ligeros cambios de pendiente respecto a la morfología homogénea de la ladera generada por la estructura del sustrato rocoso del Flysch.

Tanto en el caso de los depósitos coluviales como en el de los paleodeslizamientos, se trata de materiales con estructura caótica. En el caso de los movimientos recientemente detectados, denominados ahora como SPR (superficie principal de rotura) y SIR (superficie inferior de rotura), la masa movilizada es claramente concordante con el terreno autóctono. Estos deslizamientos han sido intensamente estudiados e instrumentados a lo largo de 2012 y 2013, encontrándose en la actualidad próximas a su finalización las obras para su estabilización definitiva.

Los depósitos del Flysch de Yesa cubren casi toda la ladera objeto de estudio, presentan un espesor que alcanza los 100 m en algunos casos y una estructura característica subparalela a la superficie del terreno. Bajo el flysch aparecen las Margas de Pamplona que constituyen el sustrato de toda la zona de estudio y afloran, tanto lateralmente (hacia el E) como hacia el fondo del valle, donde se ubica la presa actual y se construirá la nueva presa (figuras 2.6 a 2.9).

El macizo rocoso definido por los materiales comentados presenta una estructura replegada, caracterizada por la presencia de una estructura anticlinal en la coronación de la ladera, lo que implica que el relieve que se observa es en realidad un relieve estructural (figura 2.4), tal y como ocurre en el Monte de Mérida situado en la margen izquierda, y un sinclinal al pie de la ladera, en el entorno definido entre la carretera nacional y la presa actual (figura 2.5).



Figura 2.4: Coronación de la ladera objeto de estudio donde se observa como la topografía del terreno sigue la estructura geológica del macizo rocoso, constituyendo un relieve estructural en una zona de anticlinal.



Figura 2.5: Detalle del buzamiento hacia el N que presentan las capas del Flysch aguas abajo de la presa actual, al pie de la ladera, como consecuencia de la estructura sinclinal existente.

En ambos casos se trata de pliegues con ejes orientados E-O y ENE-OSO, con cierta vergencia al Oeste, muy evidente en el sector E de la zona de estudio, entre la carretera y el embalse (figuras 2.6 a 2.9).

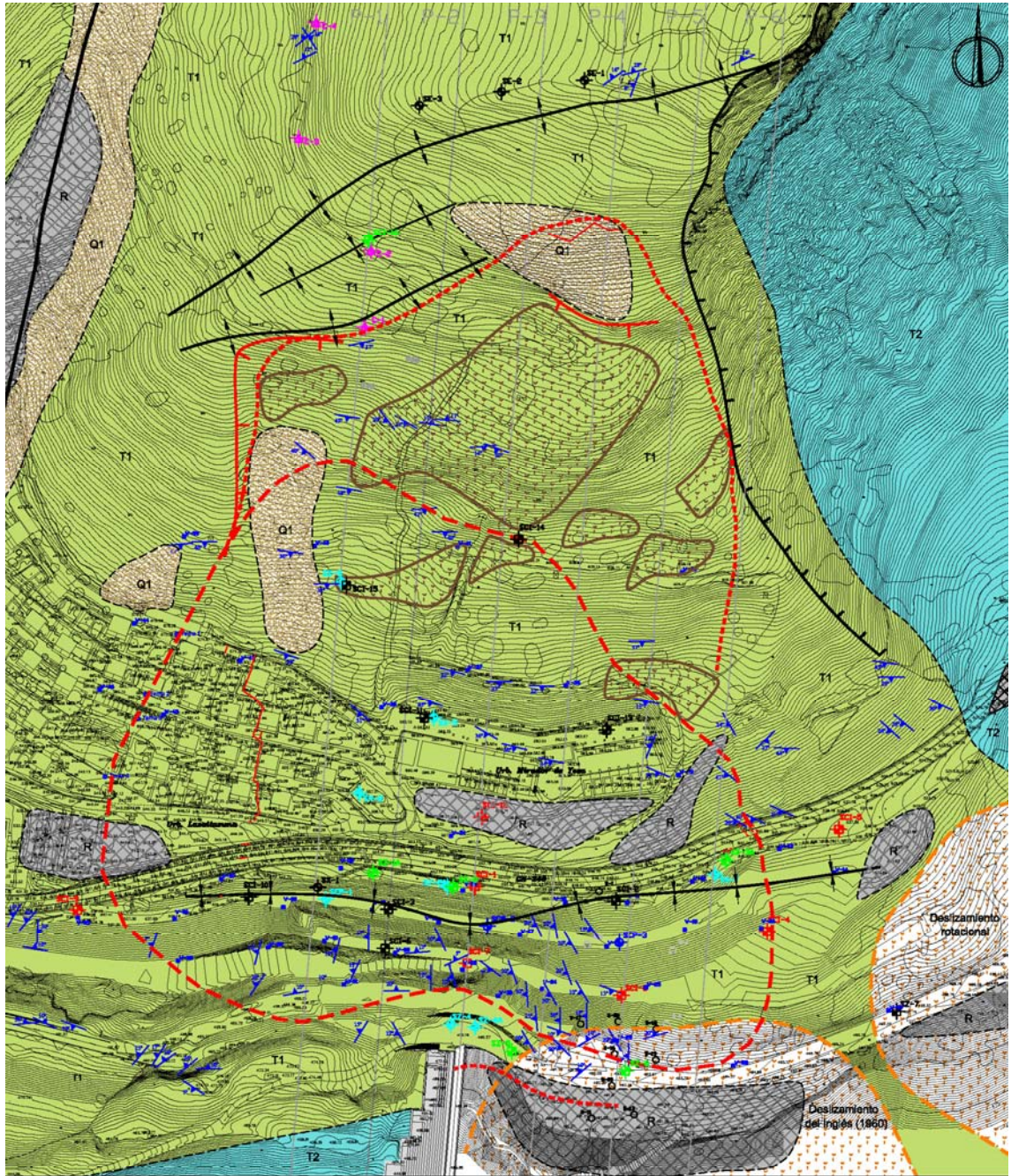
Se observan además algunos repliegues a escala local, más evidentes en la parte alta de la ladera, siguiendo las trazas de los ejes anticlinal y sinclinal principales, que provocan cambios en el buzamiento de los estratos a escala decamétrica a hectométrica, pero que no dislocan la estructura del flysch. Las margas infrayacentes se adaptan por completo a los repliegues del flysch, dado que ambos materiales se han replegado simultáneamente ante los esfuerzos tectónicos. El comportamiento más plástico de las margas no provoca, en este caso, estructuras diferenciadas respecto a las observadas en el flysch, al tratarse en todos los casos de pliegues abiertos (figuras 2.6 a 2.9).

La estructura característica de la margen derecha estudiada es, por lo tanto, un anticlinal que define la coronación de la ladera, extendiéndose esta por su flanco Sur, e invirtiéndose el buzamiento al pie de la misma, pasando a ser Norte (figura 2.5), por la presencia de un sinclinal abierto de orientación E-O y con vergencia al Oeste.

Al pie de la ladera, por efecto del sinclinal, afloran las Margas de Pamplona, con buzamiento al Norte, y la ladera finaliza en el fondo de valle del río Aragón, delimitada al S por la Falla de Yesa. Estos buzamientos predominantes a favor de la pendiente de las laderas provocan muchos de los problemas de inestabilidad detectados en los depósitos de flysch, tanto en la ladera derecha estudiada en este caso como en la contraria.

En las figuras 2.7 a 2.9 se observa como en el pie de la ladera, tanto en los depósitos de flysch como las margas infrayacentes, presentan un suave buzamiento hacia el N (hacia aguas arriba). A continuación la estructura describe un amplio plegue sinclinal, pasando a buzarse hacia el S con ángulos que superan los 30° en la parte central de la misma, habiéndose registrado buzamientos de hasta 45° hacia el Sur. En la coronación de la ladera los buzamientos se suavizan hasta invertirse de nuevo, pasada la coronación de la ladera y parar de nuevo a tener sentido Norte, describiendo la estructura un pliegue anticlinal.

Las figuras 2.6 a 2.9 fueron elaboradas en junio de 2013 por Prospección y Geotecnia. Con el progreso de la excavación ha podido mejorarse la interpretación geológica, disponiéndose en la actualidad de un modelo más detallado elaborado por C.V. YESA U.T.E.






















UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS		SIMBOLOGÍA	
TERCIARIO T1 F.M. FLYSCH DE YESA (Alternancia de areniscas y margas en estratos decimétricos). Eoceno superior T2 F.M. MARGAS DE PAMPLONA (Margas calcáreas masivas). Eoceno medio-superior		CUATERNARIO Q1 Depósitos coluviales	
	Rellenos artificiales		Eje anticlinal
	Paleodeslizamientos correspondientes con relanos geomorfológicos.		Eje sinclinal
	Alcance supuesto del deslizamiento más superficial en el que se conserva la estructura del macizo.		Contacto litológico
	Alcance supuesto del deslizamiento profundo		Escarpe erosivo
	Deslizamiento rotacional		Escarpe geomorfológico
	Dirección y buzamiento		Falla
			Grietas
			SE-1 SE-2 SE-3 SE-4 SE-5 SE-6 SE-7 SE-8 SE-9 SE-10
			SE-11 SE-12 SE-13 SE-14 SE-15 SE-16 SE-17 SE-18 SE-19 SE-20
			SE-21 SE-22 SE-23 SE-24 SE-25 SE-26 SE-27 SE-28 SE-29 SE-30
			SE-31 SE-32 SE-33 SE-34 SE-35 SE-36 SE-37 SE-38 SE-39 SE-40
			SE-41 SE-42 SE-43 SE-44 SE-45 SE-46 SE-47 SE-48 SE-49 SE-50
			SE-51 SE-52 SE-53 SE-54 SE-55 SE-56 SE-57 SE-58 SE-59 SE-60

Figura 2.6: Planta geológica de la ladera derecha de la cerrada del embalse de Yesa. La coronación de la ladera está definida por una estructura anticlinal y al pie de la misma destaca una estructura sinclinal abierta de amplio radio. Se muestra el alcance del movimiento observado en la ladera objeto de estudio en junio de 2013.

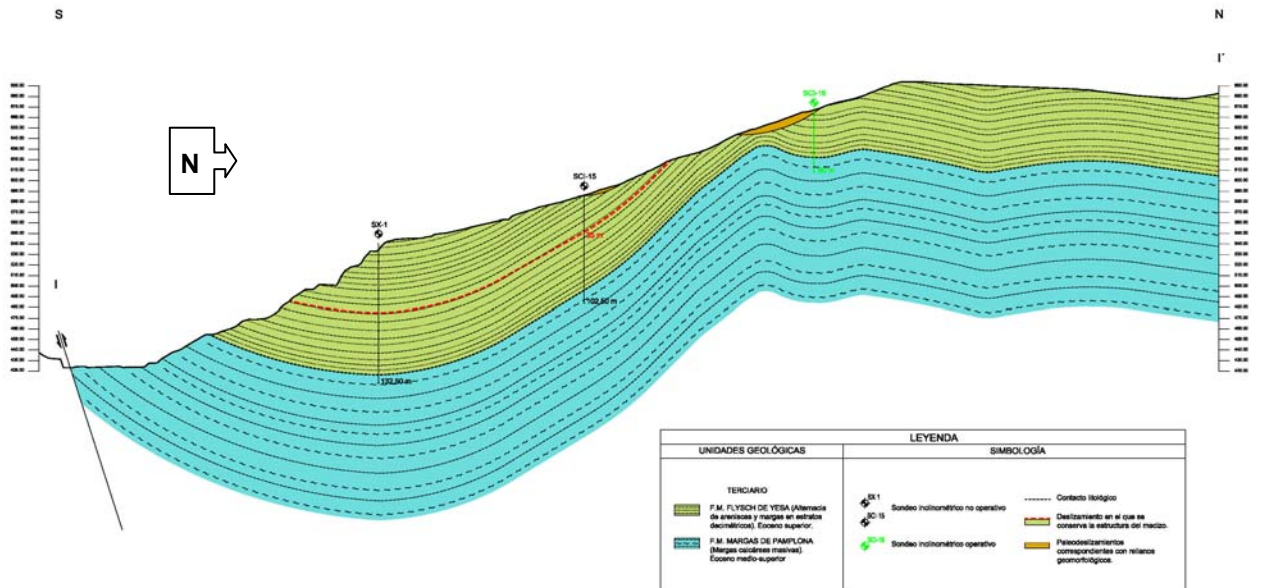


Figura 2.7: Perfil geológico de la ladera derecha de la cerrada del embalse de Yesa. Se sitúa en el eje de la nueva presa. Se observa la secuencia de materiales del Flysch de Yesa (color verde) sobre las Margas de Pamplona (color azul). La coronación de la ladera está definida por una estructura anticlinal y al pie de la misma destaca una estructura sinclinal abierta de amplio radio. Se muestra el alcance del movimiento registrado en el terreno (junio 2013).

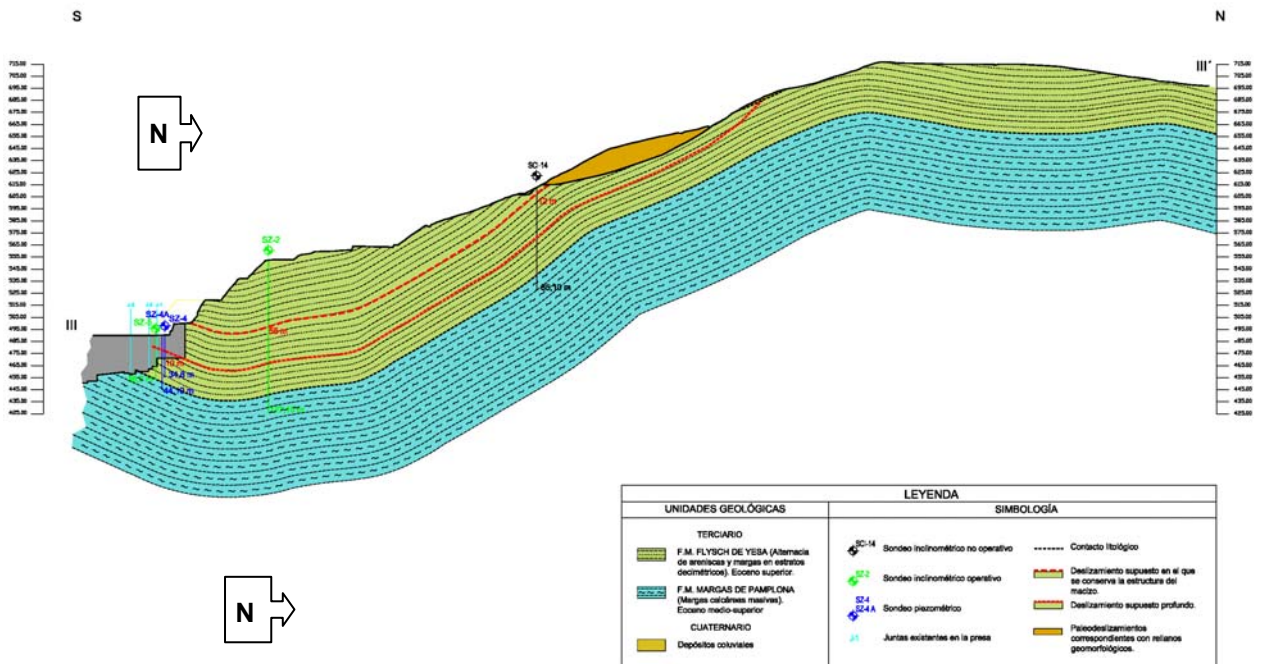


Figura 2.8: Perfil geológico de la ladera derecha de la cerrada del embalse de Yesa. Se sitúa en el eje de la presa actual. Se observa el movimiento reconocido (superior) y otro más profundo que se intuye en el inclinómetro situado junto al estribo derecho de la presa actual. Este último movimiento, con la información de que se dispone actualmente, se sitúa más próximo al contacto con las margas.

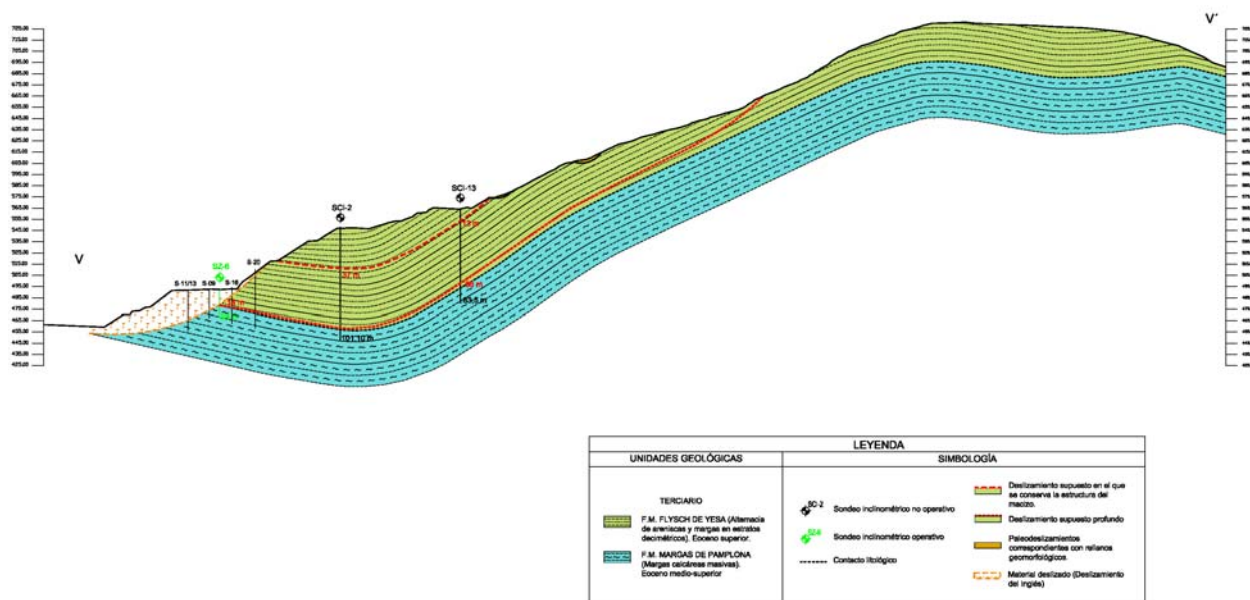


Figura 2.9: Perfil geológico de la ladera derecha de la cerrada del embalse de Yesa. Se sitúa aguas arriba de la presa actual, en la zona del Deslizamiento del Inglés. Se observa el movimiento reconocido (superior) y otro más profundo deducido de la instrumentación. Además se observa la masa inestable situada al pie de la ladera conocida como Deslizamiento del Inglés. El talud situado sobre el deslizamiento del Inglés se sabe ahora que está afectado por una cierta inestabilidad superficial.

Como se comentaba anteriormente, con el progreso de la excavación ha podido mejorarse la interpretación geológica, disponiéndose en la actualidad de un modelo más detallado elaborado por C.V. YESA U.T.E. En dicho modelo han podido evaluarse con mayor detalle los repliegues menores que presenta la estructura en la ladera, a los cuales se adaptan las superficies de deslizamiento.

Un ejemplo de dichos modelos se muestra a continuación en las figuras 2.10 a 2.13.

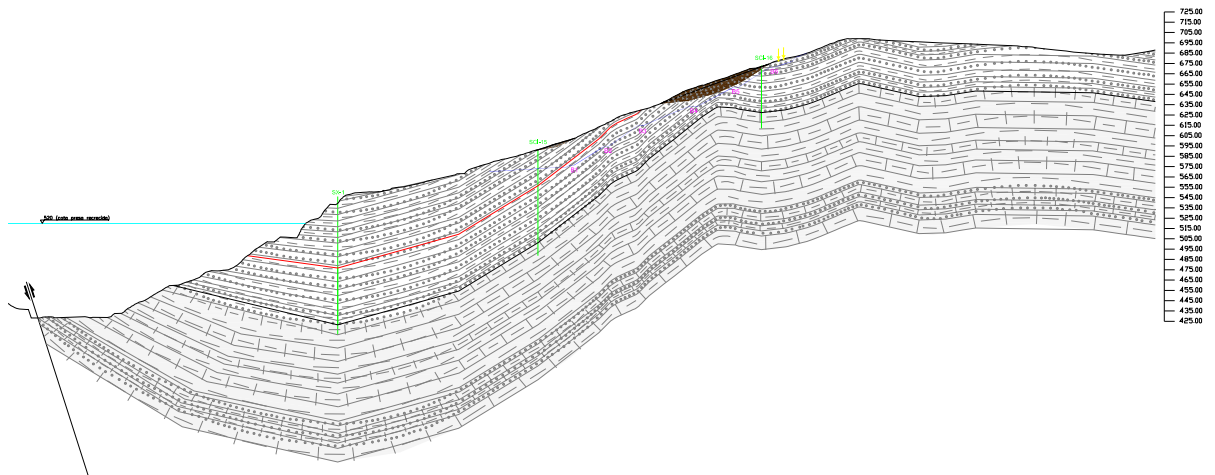


Figura 2.10: Perfil geológico de la ladera derecha de la cerrada del embalse de Yesa. Se sitúa en el eje de la nueva presa. Se observa la secuencia de materiales del Flysch de Yesa sobre las Margas de Pamplona. La coronación de la ladera está definida por una estructura anticlinal y al pie de la misma destaca una estructura sinclinal abierta de amplio radio. Se muestra el alcance del movimiento registrado en el terreno.

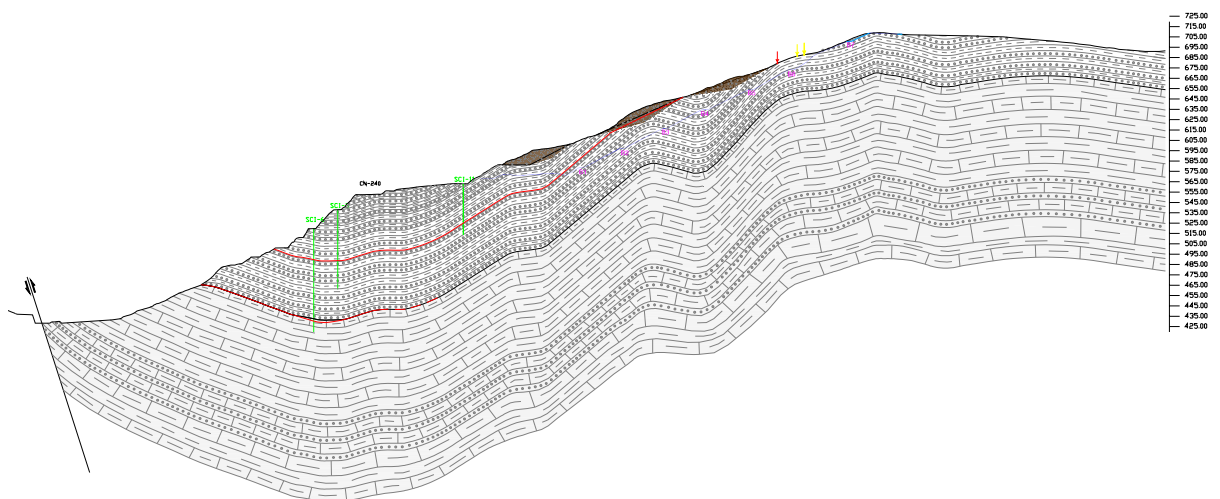


Figura 2.11: Perfil geológico de la ladera derecha de la cerrada del embalse de Yesa. Se sitúa entre la presa actual y la futura presa. Se observa el movimiento claramente reconocido SPR (línea roja superior) y otro más profundo que se intuía en la instrumentación SIR (línea roja inferior).

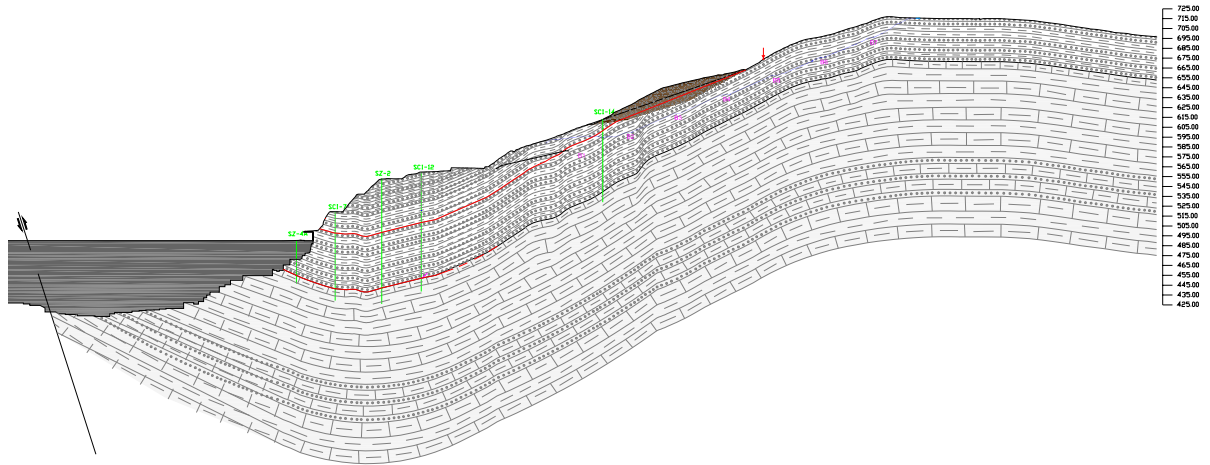


Figura 2.12: Perfil geológico de la ladera derecha de la cerrada del embalse de Yesa. Se sitúa en el eje de la presa actual. Se observa el movimiento reconocido SPR y otro más profundo SIR deducido de la instrumentación.

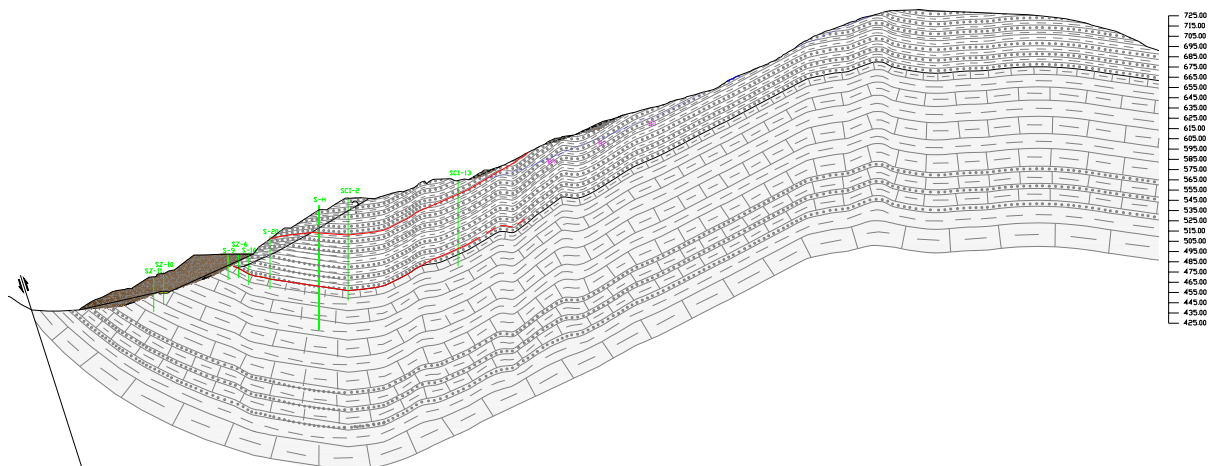


Figura 2.13: Perfil geológico de la ladera derecha de la cerrada del embalse de Yesa. Se sitúa aguas arriba de la presa actual, en la zona del Deslizamiento del Inglés. Se observa el movimiento principal SPR (superior) y otro más profundo SIR deducido de la instrumentación. Además se observa la masa inestable situada al pie de la ladera conocida como Deslizamiento del Inglés, así como su prolongación hacia la coronación del talud como consecuencia de un movimiento retrogresivo asociado a la masa inestable del pie.

El rango variable de buzamientos y orientaciones que presenta el flysch en esta ladera y en la ladera contraria del embalse, hace que se desarrollen múltiples tipologías de inestabilidades en el terreno, sobre todo en excavaciones antrópicas. En la ladera derecha, a la vista de la estructura que se muestra en las figuras 2.6 a 2.13, se pone de manifiesto que las tipologías de los movimientos necesariamente han de ser traslacionales planares, capa sobre capa, siguiendo la estratificación del macizo rocoso. Esta afirmación se apoya,

además, en los resultados de la auscultación de la ladera (inclinómetros), que permiten correlacionar el movimiento de unos puntos a otros, observándose una clara continuidad a favor de los estratos.

El elevado grado de fracturación que presentan los depósitos de flysch hace posible que, en ocasiones, puedan comportarse como un material isótropo, desarrollándose en ellos movimientos rotacionales, sobre todo cuando el material aparece más descomprimido y alterado en superficie. En este caso se han reconocido varios deslizamientos rotacionales antiguos en la mitad superior de la ladera (Gutierrez, F., 2013).

En la figura 2.14 se muestran los paleodeslizamientos presentes en la parte alta de la ladera (según Gutiérrez, F., 2013).

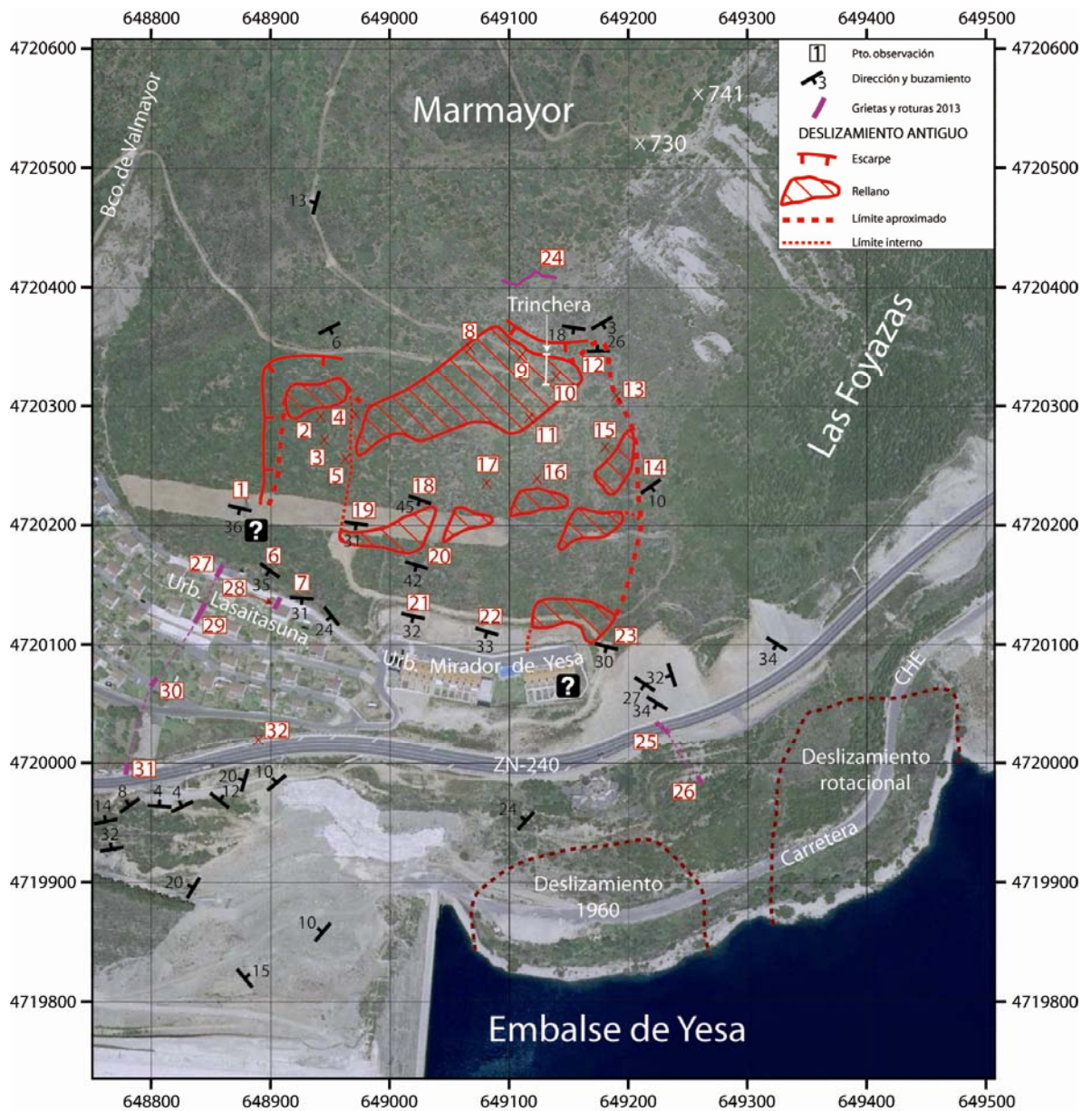


Figura 2.14: Cartografía geomorfológica de la ladera derecha de la presa de Yesa (Gutiérrez, F., 2013). Se observa la representación de los antiguos deslizamientos que tapizan la ladera en la parte superior de la misma. Se trata, según ha podido comprobarse en campo, de deslizamientos aislados de espesor moderado.

3. PROCESOS DE INESTABILIDAD DE LA LADERA

3.1. ALCANCE DE LOS MOVIMIENTOS DETECTADOS

En la ladera derecha de la cerrada del embalse de Yesa se estudió en 2013 la presencia de un proceso de inestabilidad que afecta a los materiales del Flysch de Yesa, no viéndose involucrado el sustrato de Margas de Pamplona ni las capas más profundas de Flysch. Se dedujo la existencia de una superficie de rotura principal SPR cuyos límites se marcaban con cierta claridad en diversos puntos de la ladera (figura 3.1).

El movimiento del terreno se puso de manifiesto en el verano de 2012 tras una campaña de auscultación inclinométrica, no habiéndose observado hasta ese momento evidencias de su presencia. El movimiento se fue haciendo patente en lecturas sucesivas, por lo que se incrementó el número de inclinómetros y se intensificó el seguimiento topográfico de la ladera, lo que hizo posible la delimitación del perímetro de la zona afectada.

La zona en la que se observaba el movimiento del terreno afectado por la SPR cubría un área de unas 13,7 hectáreas (figura 2.6 y 3.1), donde el terreno mostraba un movimiento de naturaleza predominantemente planar, ocurrido por el despegue capa sobre capa entre estratos del flysch, constituido este por una alternancia de capas de areniscas y margas. El deslizamiento observado tenía un claro control estructural, pues se producía mayoritariamente a favor de la estratificación de la roca. Es destacable también el hecho de que el movimiento es claramente traslacional, observándose escasos movimientos diferenciales dentro de la masa en movimiento (figuras 2.7. a 2.13).

La auscultación inclinométrica puso de manifiesto la correlación entre los movimientos registrados en los distintos inclinómetros, así como la coherencia de dicha correlación con la estructura del macizo rocoso.

Dicha auscultación permitió, además, deducir la existencia de otro movimiento más profundo al observado sobre el terreno, de menor actividad, pero que afecta a un mayor volumen de materiales y ocupa una mayor extensión (24-25 hectáreas). La superficie inferior de rotura SIR se sitúa en este caso muy próximo al contacto Flysch de Yesa – Margas de Pamplona (ver figura 2.6 y 3.1).

Además de las superficies de rotura identificadas recientemente (SPR y SIR), desde hace décadas se conocía la existencia de un deslizamiento rotacional aguas arriba de la presa actual, el cual presentaba movimientos de muy escasa magnitud asociados a los desembalses anuales. Es el conocido como Deslizamiento del Inglés, que afecta a una superficie de 0,41 hectáreas, en la parte principalmente sumergida de la ladera, y al cual se asocia una zona en la que se detecta movimiento, aguas arriba del Deslizamiento del Inglés, como consecuencia de movimientos progresivos en el talud del pie de la ladera (figura 3.1).

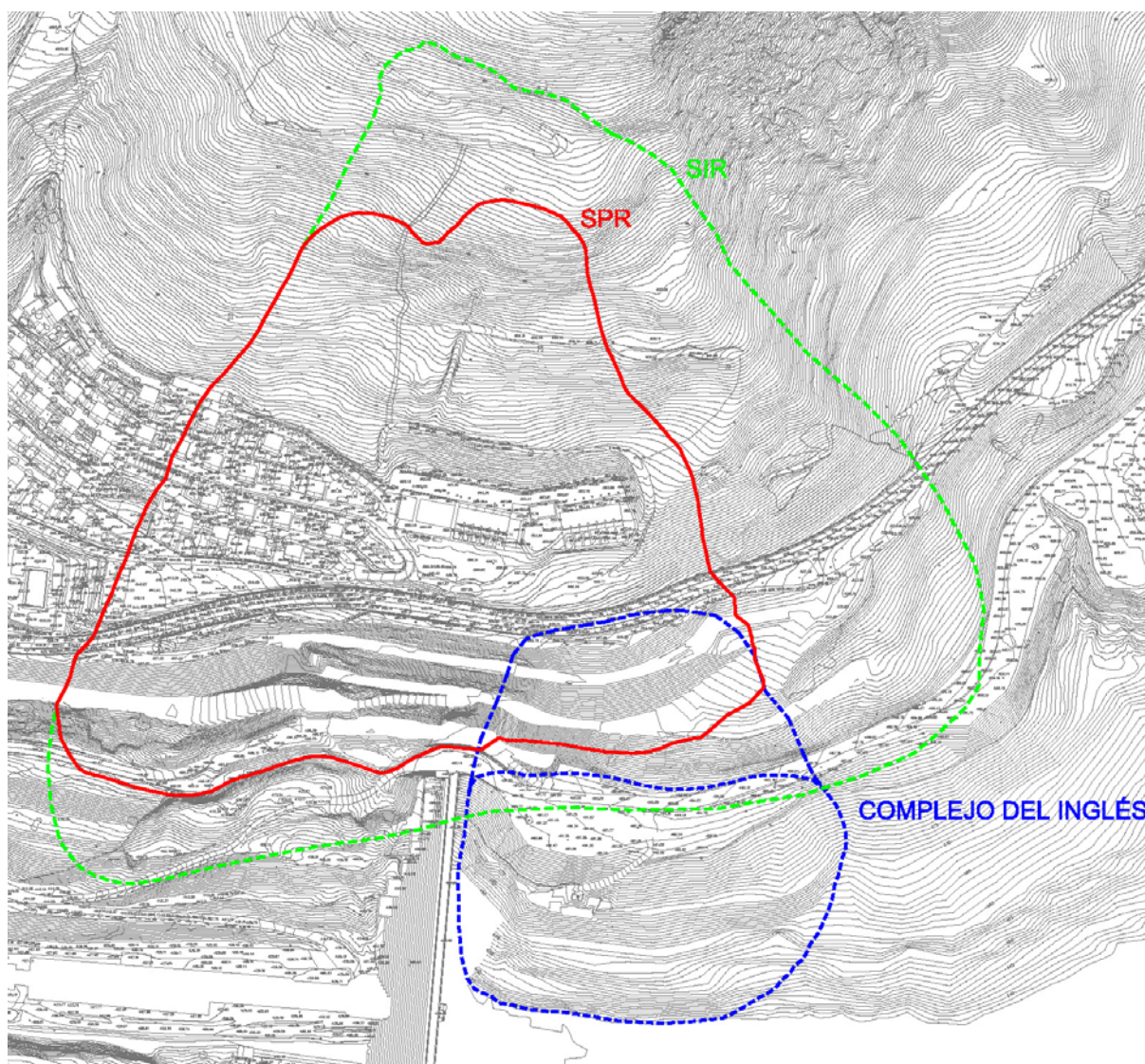


Figura 3.1: Representación del alcance de las superficies de rotura detectadas en la ladera derecha de la cerrada de Yesa. En color rojo se muestra el alcance de la superficie principal de rotura SPR, la que se puso de manifiesto en 2012-2013. En color verde la superficie inferior de rotura SIR, cuya presencia fue deducida a partir de datos de instrumentación. En color azul se observa el alcance del Deslizamiento del Inglés, tanto de su masa principal (inferior) como de los movimientos progresivos observados en el talud asociados al deslizamiento (Imagen suministrada por C.V. YESA U.T.E.).



Figura 3.2: Vista aérea de la ladera derecha de la cerrada del embalse de Yesa en la que se muestra el alcance aproximado de la masa inestable estudiada, delimitada por la superficie principal de rotura SPR. Se observa el inicio de las actuaciones que se estaban llevando a cabo para su estabilización, cuando estas se encontraban en sus fases iniciales: eliminación de peso en coronación y aplicación de una masa estabilizadora al pie (Foto tomada de www.yesano.com, autor Miguel Santamaría).

Pudo comprobarse que el movimiento estudiado consistía en un movimiento profundo, alcanzando los 60 m de profundidad en algún registro inclinométrico (figura 3.3). Se observó también que dicho movimiento era más o menos homogéneo en toda la ladera afectada, aunque con una ligera diferencia de velocidad, creciente de Oeste a Este. Se llegaron a alcanzar velocidades de movimiento de hasta 5 mm/día (figura 3.4) a mediados de febrero de 2013. En junio de 2013, una vez realizada la eliminación parcial de tierras de la coronación de la ladera, la velocidad se había reducido hasta menos de 0.2 mm/día.

En la actualidad (2014), una vez finalizada la excavación de la ladera (a falta de la eliminación de 90.000 m³ por la presencia de una torre eléctrica), el movimiento es inapreciable en la instrumentación del interior del terreno (inclinómetros), dando a entender que el movimiento se ha detenido, y difícilmente medible en superficie dada su escasa magnitud (1-2 mm/mes). El escaso movimiento registrado parece obedecer, por lo tanto, al reajuste superficial de la nueva configuración de la ladera, cambios de humedad en superficie, reptación superficial, etc., no a movimiento a favor de las superficies de deslizamiento reconocidas.

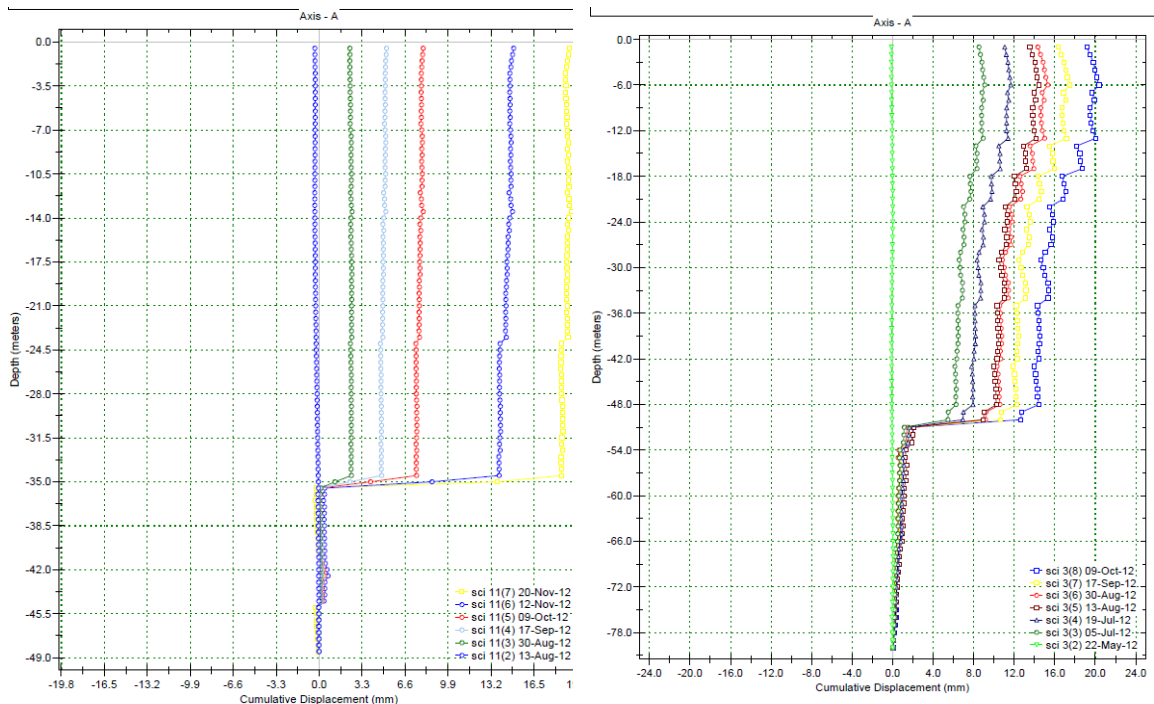


Figura 3.3: Lecturas de los inclinómetros SCI-11 y SCI- 3 en 2013, donde se mostraba con claridad una superficie de despegue en el terreno a 35 m y a 50 m respectivamente. Se observaba la presencia de otras superficies de mucha menor entidad, tanto más someras como más profundas.

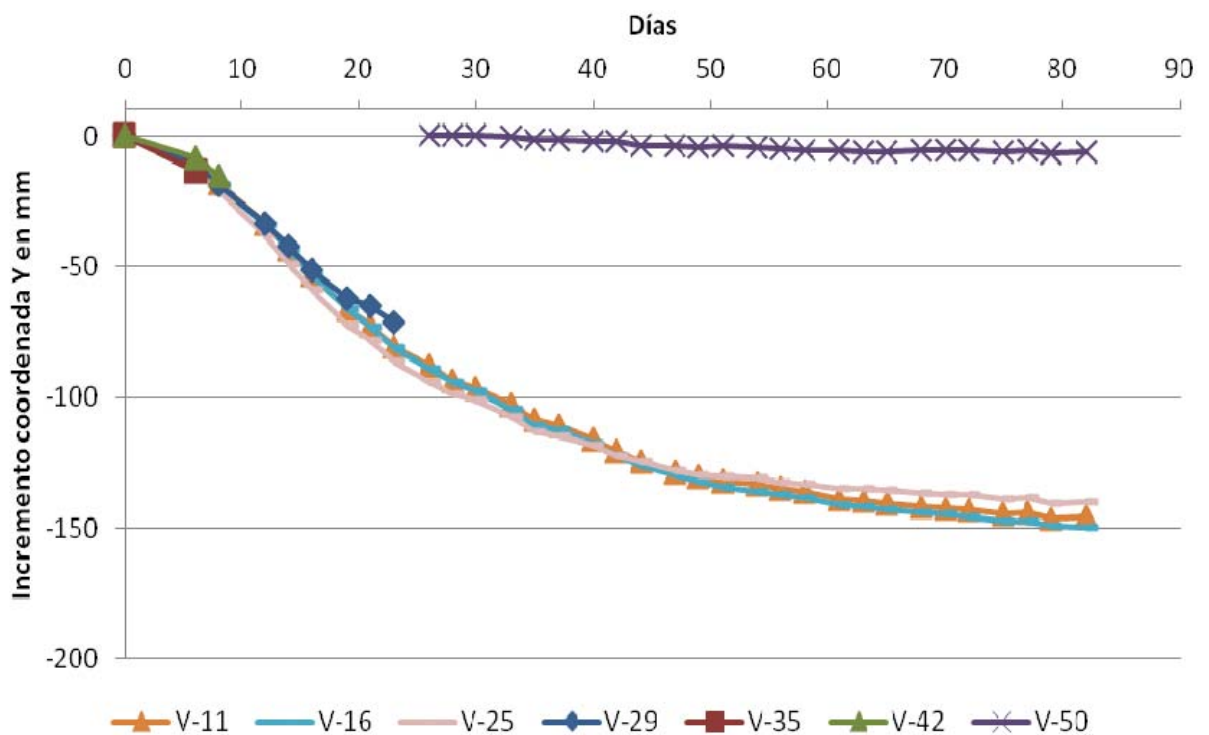


Figura 3.4: Evolución del movimiento en la ladera con el tiempo (eje 5). Se observaba la ralentización del desplazamiento del terreno según progresaba el movimiento de tierras de la coronación de la ladera. Se registró un movimiento máximo de 40 mm /semana (15/02/2013), mientras que a finales de abril de 2013 se encontraba en torno a 1 mm/semana.

El desplazamiento del terreno se observaba con claridad en el perímetro de la zona afectada, especialmente cuando los límites de la masa desplazada interceptan elementos rígidos como viales, muros, cunetas (figuras 3.5 a 3.20), y se reconoce con mayor dificultad en el terreno natural, si bien no plantea dudas en gran parte de sus límites.



Figura 3.5: Límite Este de la masa inestable definida por la superficie de rotura principal SPR, marcada con claridad en la carretera N-240. Se observa una grieta que sigue la proyección de la estratificación sobre la superficie horizontal de la calzada.

Como se muestra en la figura 3.5, el límite Este de la masa inestable principal SPR se observa con claridad en la carretera N-240, donde se ve una grieta oblicua a la misma, que constituye la proyección horizontal de la estratificación del flysch. En este sector de la ladera, la superficie de despegue se sitúa relativamente próximo al contacto del flysch con las margas infrayacentes.

El límite Este del desplazamiento se muestra también en las fotografías de las figuras 3.6 a 3.10, que corresponden al camino que discurre junto a la carretera aguas abajo, al bordillo de la propia carretera y sobre todo al talud de la carretera, donde se observa el límite E de la superficie principal de deslizamiento SPR, y a unos 120 m de distancia el límite E de la superficie de rotura profunda SIR.



Figura 3.6: Límite Este de la masa inestable delimitada por la superficie principal de rotura SPR, que se observa en el camino bajo la carretera N-240. Puede verse una grieta que sigue la proyección de la estratificación sobre la superficie horizontal del camino.



Figura 3.7: Límite Este de la masa inestable delimitada por la superficie principal de rotura SPR, que provoca la rotura en un bordillo de la carretera N-240. El límite de la rotura se sitúa en el Flysch próximo al contacto con las Margas de Pamplona, en el talud de la propia carretera.



Figura 3.8: Detalle de la imagen mostrada en la figura 3.7 tomada en noviembre de 2013, donde se muestra la presencia de humedad en los planos que constituyen el límite E de la superficie principal de rotura SPR. Destaca la presencia de agua, pero no se observan, en ningún caso, afluencias importantes, solo humedades.



Figura 3.9: Avanzando unos 120 m a lo largo del talud de la carretera N-240 se observa el límite E de la superficie inferior de rotura SIR, ya inmerso en las proximidades del contacto Flysch de Yesa – Margas de Pamplona, donde predominan los paquetes margosos de espesor métrico y la presencia de niveles de arenisca es claramente minoritaria



Figura 3.10: Detalle de la imagen mostrada en la figura anterior, donde se observa el límite E de la SIR, a favor de un paquete de areniscas de la base del Flysch, que descansa sobre un potente estrato de margas de varios metros de espesor, que da paso a las Margas de Pamplona.



Figura 3.11: Límite Oeste de la masa inestable, que provoca la rotura de la cuneta de la carretera N-240. En la calzada no se ve una grieta transversal, si bien se observa la apertura de la calzada a lo largo de una junta longitudinal del aglomerado (figura 3.12).



Figura 3.12: Límite Oeste de la masa inestable que provoca la apertura de la calzada a lo largo de una junta longitudinal del aglomerado. El hecho de no observarse con claridad el límite lateral de la masa movilizada muestra la escasa actividad del movimiento observado.

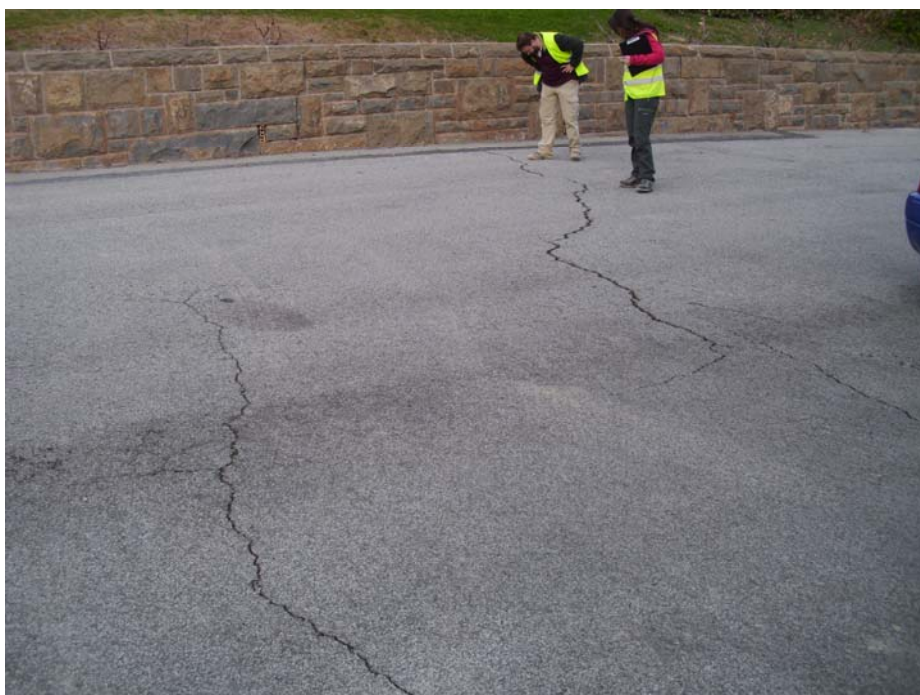


Figura 3.13: Límite Oeste de la masa inestable que provoca grietas en los viales de la Urbanización Lasaitasuna. Vista de la calle 2. El límite Oeste es común para las dos superficies de rotura SPR y SIR.



Figura 3.14: Límite Oeste de la masa inestable definido por una grieta en el vial inferior (calle 1) de la Urbanización Lasaitasuna.

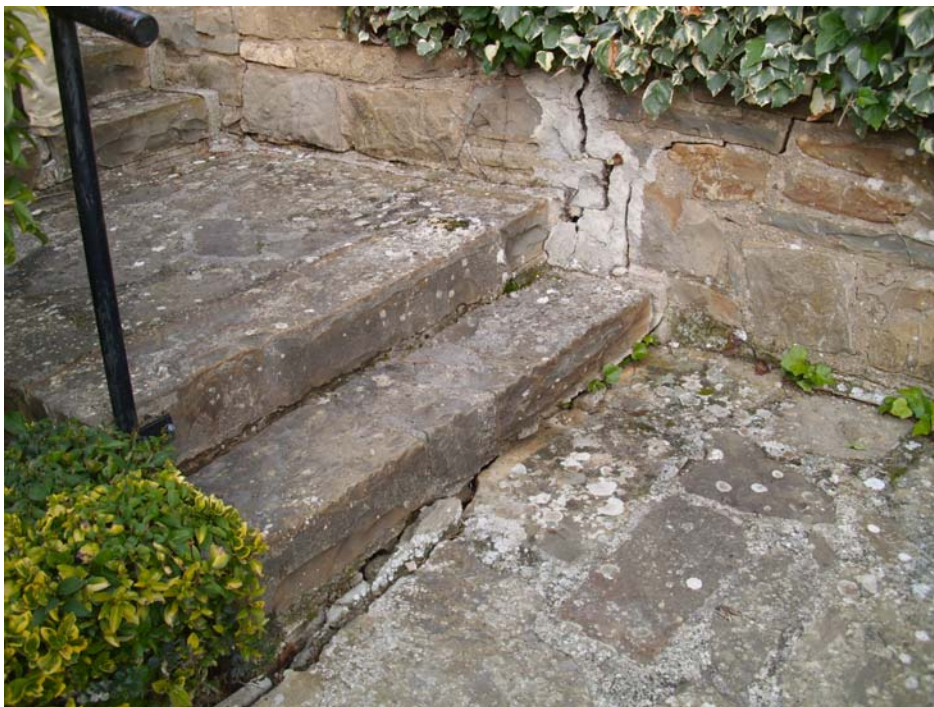


Figura 3.15: Límite Oeste de la masa inestable que provoca apertura de grietas pre existentes en muros y elementos de contención de la Urbanización Lasaitasuna.

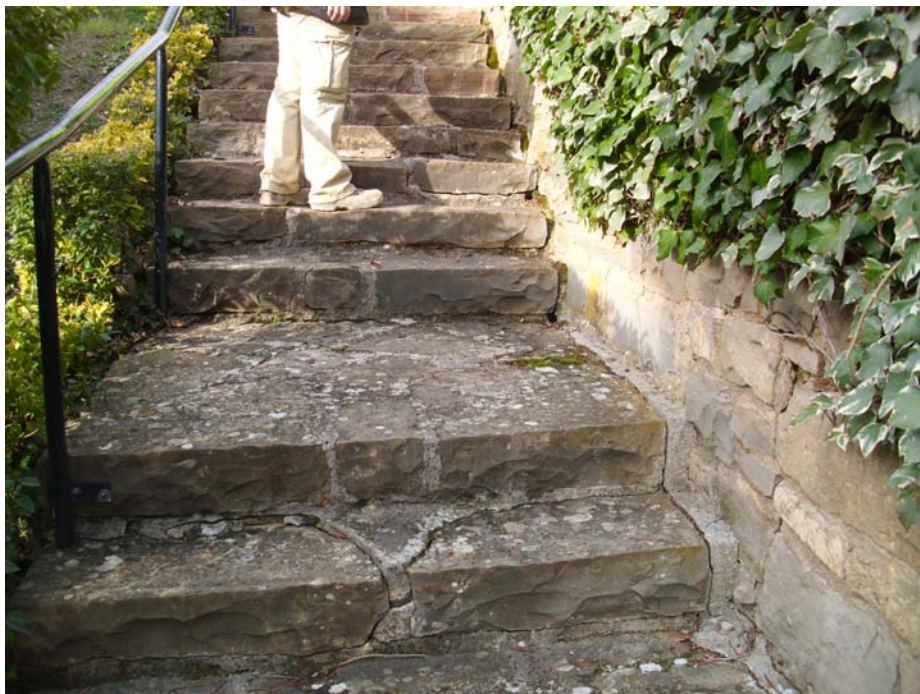


Figura 3.16: Límite Oeste de la masa inestable que provoca apertura de grietas pre existentes en muros y elementos de contención de la Urbanización Lasaitasuna. En este caso se observa la separación entre una escalera y el muro anexo. Dicha junta se encontraba previamente rejuntada con mortero.



Figura 3.17: Límite Oeste de la masa inestable que provoca apertura de una grieta en el vial intermedio de la Urbanización Lasaitasuna y en unos garajes.



Figura 3.18: Detalle de la foto anterior en la acera junto a los garajes. Se observa como dicha grieta se encontraba previamente rejunxada con mortero.



Figura 3.19: Hundimiento de una acera en la calle 3 de la Urbanización Lasaitasuna, coincidiendo con el límite Oeste de la masa inestable. Se observa como la acera consiste en un forjado de viguetas de hormigón, apoyado en una pared de ladrillos, y bajo el que no se dispuso en su día de un relleno (posiblemente porque la pared de apoyo no hubiera resistido el empuje de las tierras).



Figura 3.20: Vista de la pared de ladrillo sobre la que apoyan las viguetas del forjado que constituye la acera de la calle 3 de la Urbanización Lasaitasuna, coincidiendo con el límite Oeste de la masa inestable. Se observa el cabeceo de la coronación de la pared, coincidiendo con la zona en la que se ha producido el hundimiento de la acera.



Figura 3.21: Vista de la fachada exterior de la vivienda nº 20, situada en la calle 3 de la Urbanización Lasaitasuna, coincidiendo con el límite Oeste de la masa inestable. Esta vivienda ha sido claramente afectada por el movimiento diferencial que se ha producido en el terreno al situarse en el límite del deslizamiento. Las viviendas que se encuentran dentro o fuera de la masa inestable no presentan daños de consideración similar.



Figura 3.22: Vista de la fachada al patio de la vivienda nº 20, situada en la calle 3 de la Urbanización Lasaitasuna, coincidiendo con el límite Oeste de la masa inestable. Se observan grietas provocadas por el movimiento diferencial del terreno. La mala calidad de la construcción, ha provocado que la cimentación no se haya comportado como un elemento rígido, permitiendo la distorsión de la estructura.



Figura 3.23: Vista de la grieta transversal observada en le calle 4 de la Urbanización Lasaitasuna, prolongación de la observada en la calle 3 y que afecta a la vivienda nº20. Se observa un salto lateral de unos 3 cm y un salto vertical de 1 cm. Se trata de una grieta que ya se encontraba rejuntada anteriormente y en la que se ha producido una reapertura mayor. Límite Oeste del deslizamiento.

En el sector Oeste de la zona movilizada se observa también la presencia de una grieta, subparalela a la que limita la masa inestable, pero a unos 50 a 100 m de distancia hacia el Este (distancia creciente de N a S), que define el límite de un movimiento diferencial dentro de la masa desplazada (figura 3.24).

Este fenómeno es característico de los materiales de tipo flysch, en los que se desarrolla una superficie de desplazamiento principal, donde se concentra la mayor parte del desplazamiento, pero luego se produce un efecto de arrastre que moviliza, en mucha menor medida, otros planos de estratificación. Esta movilización parcial de otros planos paralelos al plano de deslizamiento principal se observa en el registro de algunos inclinómetros (figura 3.4).

Este fenómeno justifica la necesidad de estabilizar este tipo de deslizamientos mediante actuaciones integrales, con redistribución de masas, tal y como se ha llevado a cabo recientemente, no siendo eficaz aquellas actuaciones encaminadas a la estabilización o el cosido de una superficie de deslizamiento concreta.

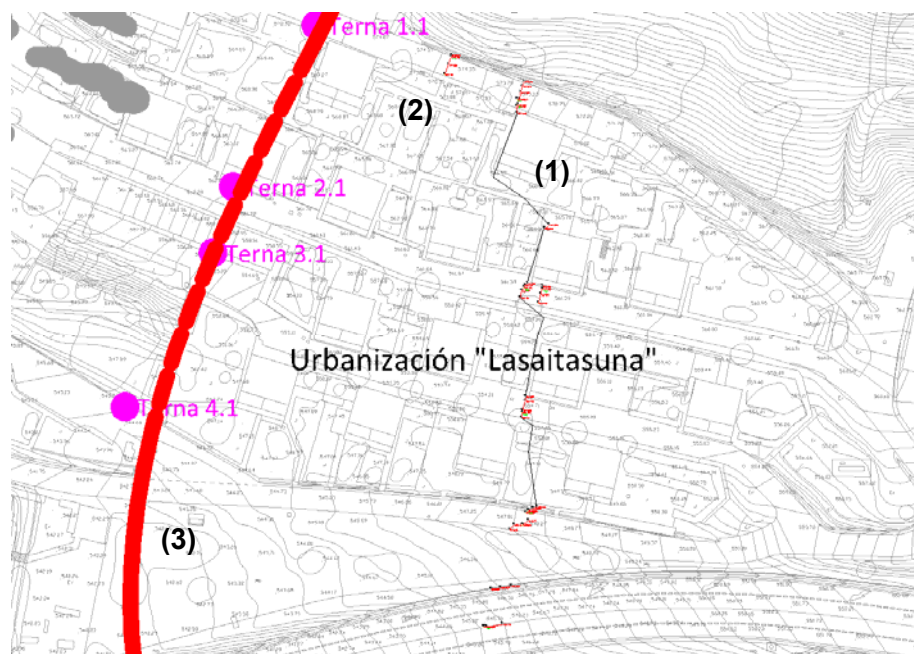


Figura 3.24: Localización de la grieta intermedia observada en el sector Oeste de la ladera (1), que recorre la Urbanización Lasaitasuna de N a S. Se sitúa a una distancia creciente de 50 a 100 m respecto al límite Oeste de la masa movilizada (3). Se observa, además, una pequeña grieta (2) entre la que constituye el límite Oeste y la grieta intermedia (figura 3.25).



Figura 3.25: Apertura de una junta de hormigonado en la calle 4, a una distancia de 30 m al Este de la grieta de la figura 3.23 (la que define el límite Oeste de la masa movilizada) y a 20 m al Oeste de la grieta intermedia mostrada en la figura 3.24.



Figura 3.26: Vista de la grieta transversal observada en le calle 4 de la Urbanización Lasaitasuna, que corresponde a la grieta intermedia situada a una distancia creciente de 50 a 100 m respecto a la que constituye el límite Oeste. Provoca daños en viales, muros y viviendas.



Figura 3.27: Vista de los daños provocados por la grieta intermedia en la fachada del patio de la vivienda situada entre las calles 3 y 4.



Figura 3.28: Detalle de los daños provocados por la grieta intermedia en la fachada del patio de la vivienda situada entre las calles 3 y 4. Se observa como la fachada de la casa está constituida por ladrillos huecos con enfoscado de cemento.



Figura 3.29: La grieta intermedia recorre toda la Urbanización Lasaitasuna, de N a S, provocando grietas transversales en viales y en construcciones anexas a las viviendas. No se observa en la CN-240, salvo por una apertura lateral en una junta del aglomerado (figura 3.12), volviendo a observarse en un camino que discurre aguas abajo de la CN-240, en una cuneta de hormigón

Las mayores dificultades para localizar con precisión los límites de la masa movilizada se plantean en el pie y en el sector SO del mismo, aguas abajo de la carretera nacional, donde no se han observado grietas ni deformaciones en el terreno, salvo la que se muestra en la figura 3.29. No obstante, las lecturas de los inclinómetros han permitido delimitarla con bastante precisión al pie de la ladera, aguas arriba del estribo derecho de la presa actual (ver mapa geológico en figura 2.6, y perfiles geológicos en figuras 2.7 a 2.13). Por lo tanto, la presa actual no se vería afectada por el proceso de movimiento principal observado SPR, si bien si se vería afectada por la superficie inferior de rotura SIR del terreno estudiado.

Tampoco podía distinguirse el límite superior de la rotura, tanto de la SPR como de la SIR, en la parte alta de la ladera, al no observarse grietas de coronación que marcaran el inicio del movimiento. Este se dedujo, en principio, por las lecturas inclinométricas, la auscultación topográfica, y el análisis estructural y estratigráfico de los depósitos de flysch. Posteriormente, cuando progresó la excavación de la ladera surgió una grieta en coronación que parecía delimitar el alcance máximo de la zona inestable de la superficie de rotura inferior SIR.

El hecho de que los límites del movimiento no se observen con claridad en algunos sectores y que los desplazamientos diferenciales observados en las grietas perimetrales sean de escasos centímetros (menor de 5 cm), pone de manifiesto que se trata de una masa de grandes dimensiones, pero de actividad escasa. Una vez detectado el movimiento e iniciada la eliminación parcial de masa inestable en la zona de coronación, el movimiento prácticamente se ha detenido.

El desplazamiento máximo acumulado desde que se detectó el deslizamiento, registrado mediante topografía de precisión, ha sido de 25-30 cm, siendo los valores medios de desplazamiento acumulado inferiores a 15 cm. En la figura 3.30 se muestran unos gráficos tomados de la empresa TYPESA en los que se muestra la distribución de los movimientos acumulados en la ladera, tanto en componente horizontal como vertical.

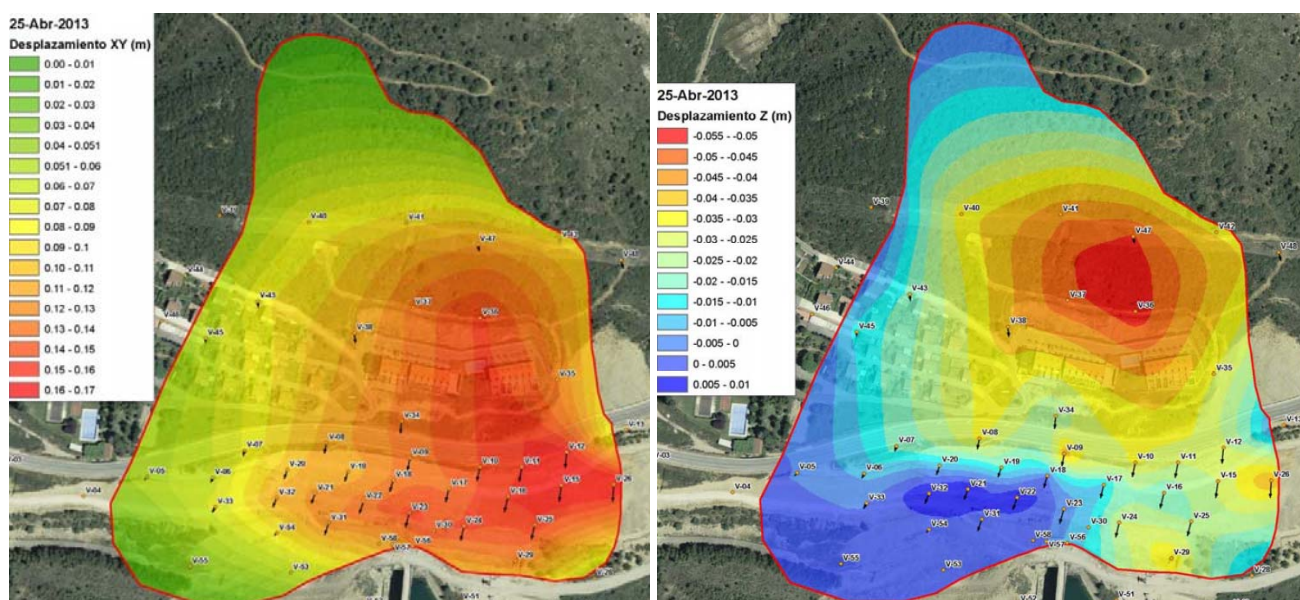


Figura 3.30: Desplazamiento registrado en la ladera con topografía de precisión. En la imagen de la izquierda se muestra el movimiento horizontal registrado a fecha 25 de abril de 2013. En la figura de la derecha puede verse el movimiento vertical. En la actualidad el movimiento se encuentra detenido. Figuras tomadas de TYPESA.

Casi la totalidad de los movimientos observados en la ladera, excepción hecha del Deslizamiento del Inglés, son consecuencia del movimiento que se produce en la ladera a favor de la denominada “superficie principal de rotura” SPR. Sin embargo, la cuantía de los movimientos detectados mediante topografía supera el desplazamiento que se observa en los inclinómetros para dicha superficie.

Además, en los inclinómetros situados en el entorno del estribo derecho de la presa se observa la presencia de un desplazamiento en el terreno localizado a mayor profundidad que el estudiado, pero de muy escaso movimiento, apenas perceptible por la instrumentación. Parecía tratarse también de un movimiento que tenía el mismo mecanismo que la SPR, es decir, movimiento traslacional, capa sobre capa, a favor de los planos de estratificación. En este caso la superficie de despegue es más profunda, se sitúa muy próxima al contacto entre el Flysch de Yesa y las Margas de Pamplona, aunque dentro del ámbito del Flysch de Yesa, y ha sido denominada como “superficie inferior de rotura” SIR (figuras 3.31 y 3.32).

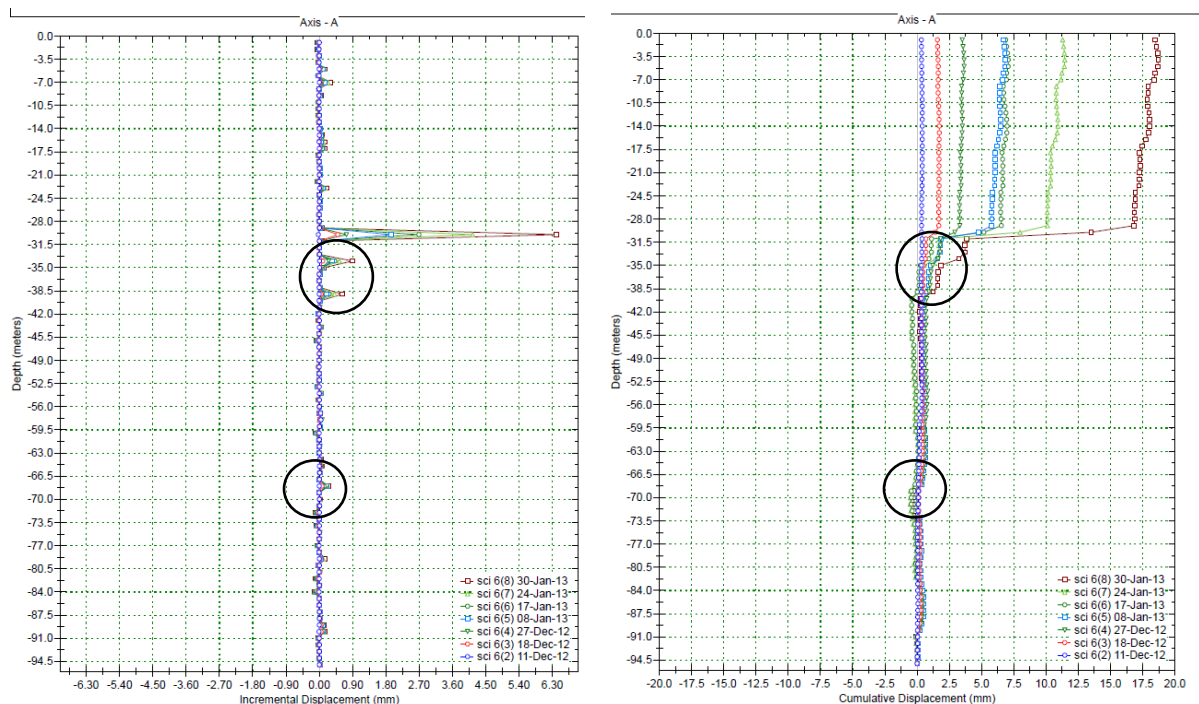


Figura 3.31: Desplazamiento incremental y desplazamiento acumulado en el inclinómetro SCI-6, situado en una berma sobre la coronación de la presa, donde además de la superficie principal de rotura (30 m), se intuyen otros a mayor profundidad de muy escasa magnitud (34 m, 39 m y 68 m).

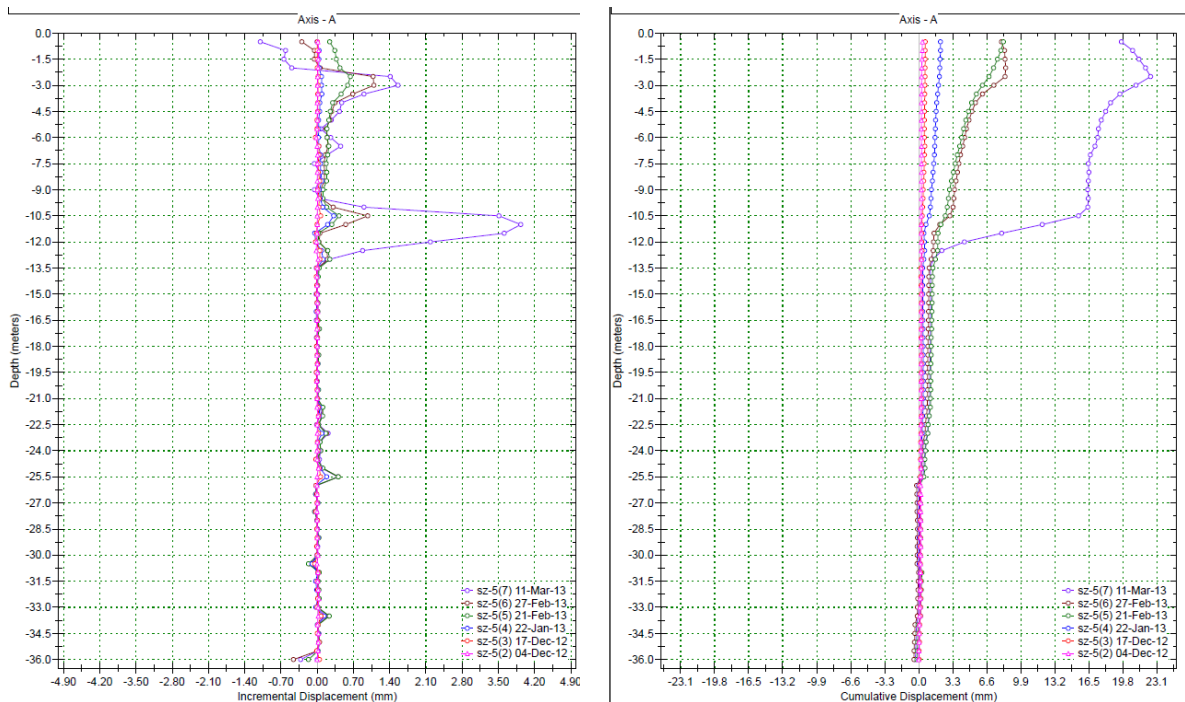


Figura 3.32: Desplazamiento incremental y desplazamiento acumulado en el inclinómetro SZ-5, situado junto al estribo de la presa, a una cota inferior al pie del deslizamiento. En este caso se registra un movimiento a 11 m de profundidad, que corresponde al Deslizamiento del Inglés y se intuye otro movimiento a 25,5 m de muy escasa magnitud, que podría corresponder a la superficie inferior de rotura SIR.

Estos movimientos más profundos, definidos por la superficie inferior de rotura SIR, parecen ser los responsables del empuje que se intuye contra la actual presa en el estribo derecho, pudiendo ser la causa de que históricamente no se observe dilatación en las juntas entre los módulos de hormigón de la propia presa, y el origen de un leve movimiento ascendente que se observa en los primeros módulos del estribo derecho, sobre todo en el módulo 0 que por sus reducidas dimensiones, no aporta apenas peso sobre el pie de la ladera.

En la figura 3.33 se muestra el resultado de las lecturas de nivelación en la coronación de la presa actual en el periodo comprendido entre 2003 y 2012.

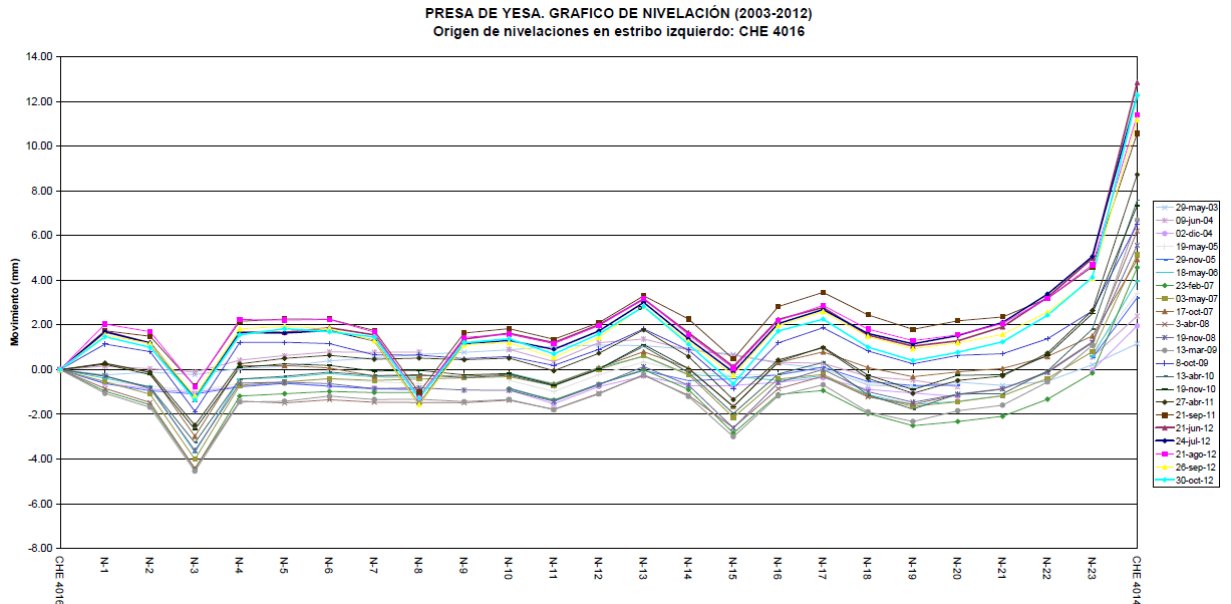


Figura 3.33: Lecturas de nivelación en la coronación de la presa de Yesa en el periodo 2003-2012. Se observa un levantamiento del bloque 0 (estribo derecho) de la presa, acentuado en los últimos años (Figura tomada de la Nota nº 21 de Ingeniería del Suelo: seguimiento de la margen derecha, Noviembre/2012).

Se observa como en el primer bloque de la presa, en el estribo derecho, se produce un ligero levantamiento que se ha acentuado en los últimos años. El levantamiento parece afectar también al bloque 1, e incluso, en menor medida, al bloque 2. El movimiento profundo que es perceptible en los inclinómetros próximos a la presa, el cual apenas tiene reflejo aguas arriba de la ladera, parece ser el origen de este movimiento que se relaciona con la superficie inferior de rotura SIR.

3.2. ACTUACIONES PARA LA ESTABILIZACIÓN DE LA LADERA

Las actuaciones que se propusieron para la estabilización de la ladera consistían, principalmente, en la excavación de un volumen de 1,5 millones de cúbicos de materiales en la parte alta de la ladera, aguas arriba de las urbanizaciones Lasaitasuna y Mirador de Yesa. Con esta excavación estaba previsto que la ladera quedase en una situación claramente estable, alcanzando un factor de seguridad superior a 1.25, lo que para una ladera de estas características representa un amplio margen de seguridad frente al deslizamiento.

Como actuación complementaria se diseñaron unos muros-jardinería que, apoyados sobre el bloque 0 de la presa actual y áreas circundantes, aportaran un peso estabilizador en el pie

de la masa inestable. Estos muros, además, impermeabilizan el sector de la ladera comprendido entre las dos presas, evitando que el llenado de la presa recrecida modificara las condiciones hidrogeológicas del terreno, haciéndolo insensible a las oscilaciones del nivel freático, que de otra forma pudieran inducir las variaciones de llenado del futuro embalse.

En definitiva se está procediendo a la redistribución de masas en la ladera, lo que sin duda constituye la actuación más eficaz en un deslizamiento de esta naturaleza. La excavación del material en la parte alta de la ladera se encuentra prácticamente finalizada, a falta solo de eliminar un volumen de unos 90.000 m³, situado aguas arriba de la Urbanización Mirador de Yesa, pendiente de que sea desplazada una torre eléctrica, lo cual tendrá lugar en breve.

Este volumen de tierras supone una carga relativamente concentrada de unas 200.000 toneladas, situadas en el punto en el que se detectaba un mayor movimiento vertical con la auscultación topográfica. Es decir, su ubicación actual es claramente desfavorable y su inminente eliminación contribuirá a mejorar claramente la estabilidad de la ladera.

La actuación que se está llevando a cabo en la actualidad no solo estabilizará el movimiento principal estudiado (superficie principal de rotura SPR), sino que hará lo propio con el movimiento profundo que se detecta (superficie inferior de rotura SIR), tal y como resulta de los recientes análisis de estabilidad realizados (capítulo 4).

De modo complementario se construirá una pantalla de impermeabilización de la ladera aguas arriba de la presa actual, que evitará, junto con los muros-jardinera, la saturación de la ladera en este sector. Esta pantalla de impermeabilización se emplaza en la cota 516, en una berma que se construirá en el talud actual sobre el Deslizamiento del Inglés. Para evitar que dicho talud se vea afectado en el futuro por la acreción del deslizamiento, el terreno se fijará al sustrato estable mediante un muro anclado (5 filas de anclajes de hasta 50 m de longitud), que garantiza la estabilidad del talud y de la zona de coronación de la pantalla de impermeabilización (figura 3.38).

En las figuras 3.34 y 3.35 se muestran sendas imágenes en las que se observa el progreso de las obras en junio de 2013 y a finales de noviembre de 2013.



Figura 3.34: Vista de la ladera derecha de la cerrada del embalse de Yesa desde la margen izquierda (junio de 2013). Se observaba el progreso de la excavación de la parte alta de la ladera (1) y la ejecución de los muros-jardinera al pie, en el entorno del estribo derecho de la presa actual y del sector entre presas (2).



Figura 3.35: Vista general de la ladera a fecha 28/11/2013 desde la ladera contraria. La excavación estaba prácticamente finalizada a falta de retirar unos 90.000 m³ tras la Urbanización Mirador de Yesa, pendientes del traslado de una torre eléctrica (1). Se observa también el progreso de la ejecución de los muros-jardinera, que aportan peso estabilizador al pie y permiten la impermeabilización de la ladera entre la presa actual y la nueva presa (2).

En la figura 3.36 se muestra un plano topográfico en el que se observa la geometría de la ladera, aguas arriba de las urbanizaciones, una vez realizada gran parte de la excavación prevista.

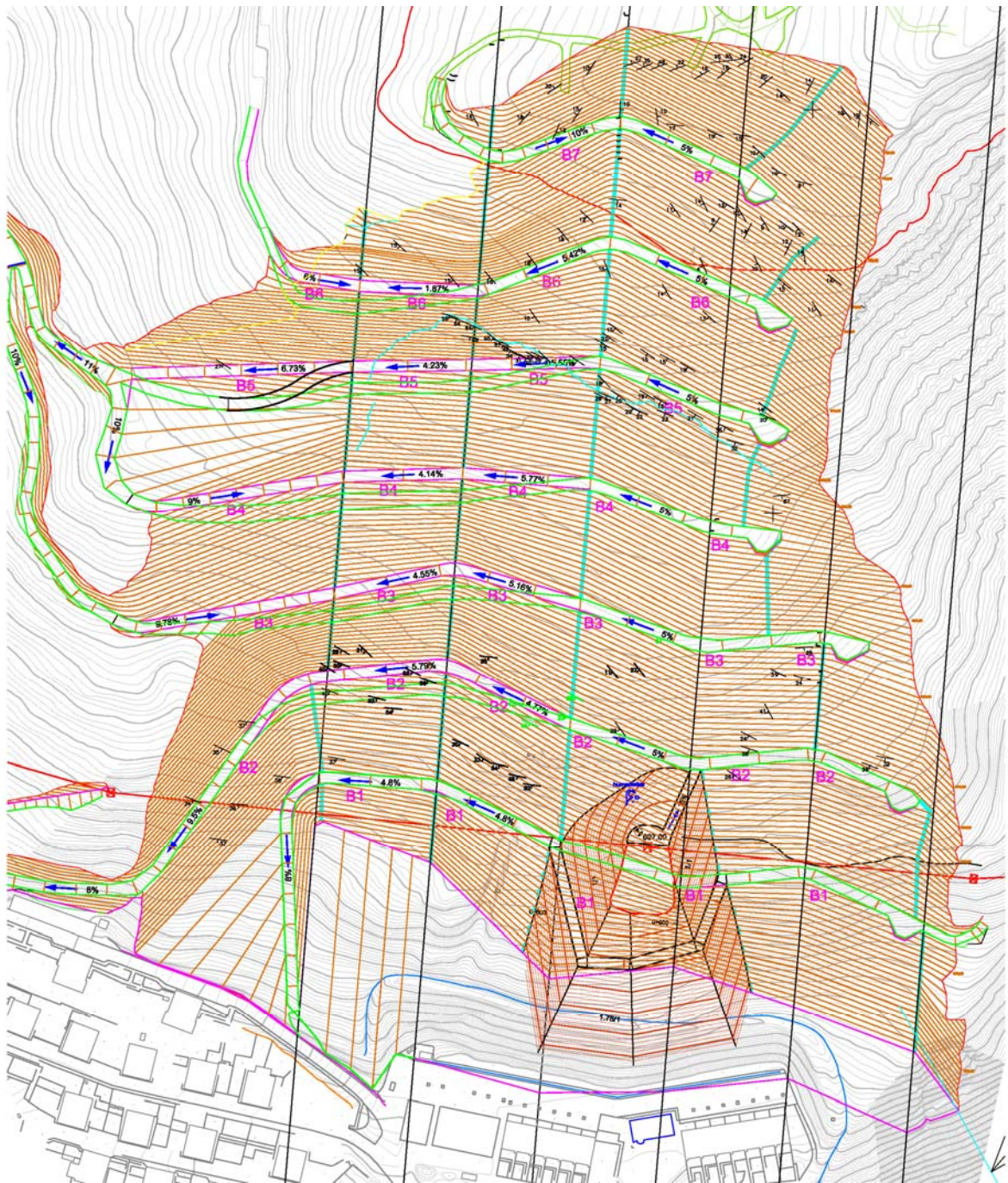


Figura 3.36: Planta topográfica de la excavación realizada en la ladera aguas arriba de las Urbanizaciones Lasaitasuna (lado izquierdo) y Mirador de Yesa (centro y derecha), la cual ha consistido en la eliminación de unos 1,5 millones de metros cúbicos. Queda pendiente de retirar unos 90.000 m³ tras la Urbanización Mirador de Yesa, a falta del traslado de una torre eléctrica. La geometría resultante es una sucesión de 8 bancos de unos 22 m de altura separados por 7 bermas.

A continuación, en las figuras 3.37 y 3.38 pueden verse unos detalles constructivos de los muros-jardinera en ejecución al pie de la ladera y de la pantalla de impermeabilización que se ejecutará aguas arriba de la presa actual

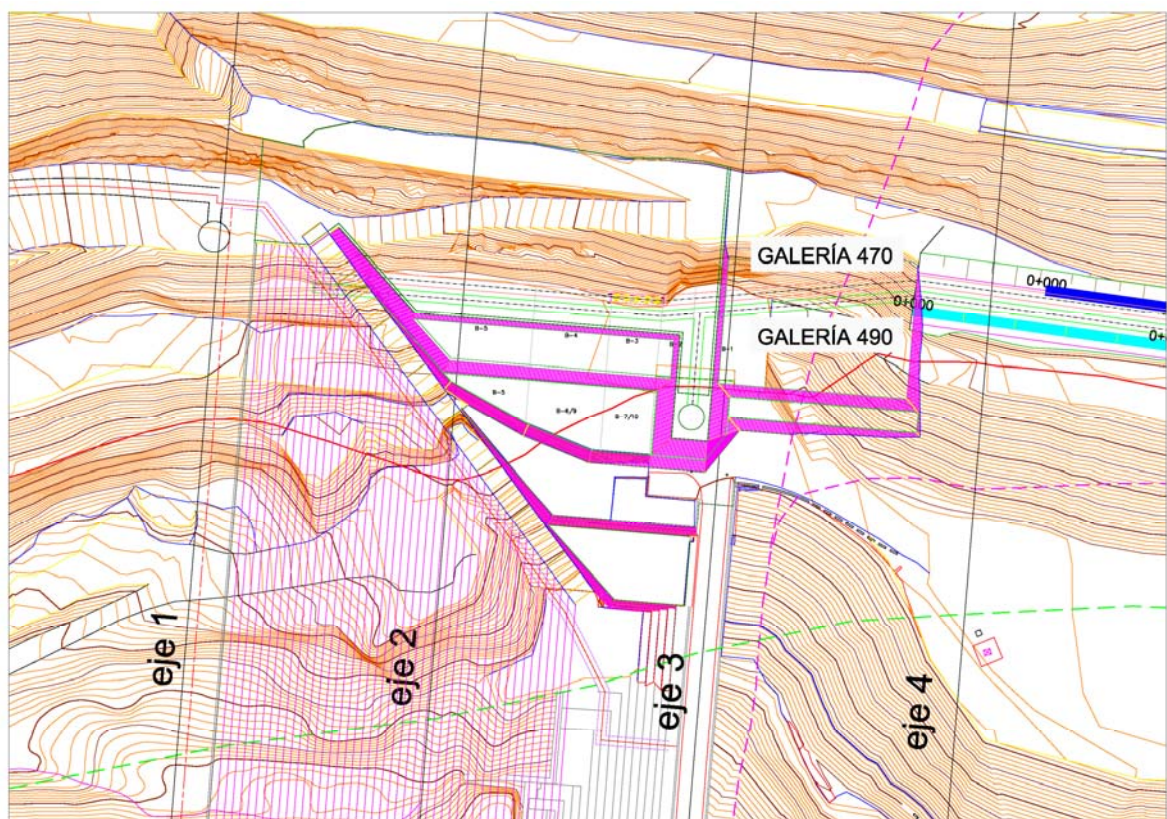


Figura 3.37: Planta topográfica del alcance de los muros jardinera en ejecución situados entre las dos presas y sobre el bloque 0 de la presa actual. El eje 1 corresponde al eje de la futura presa y el eje 3 al eje de la presa actual. Puede verse como los muros jardinera tapizan la ladera sobre el plinto de la nueva presa.

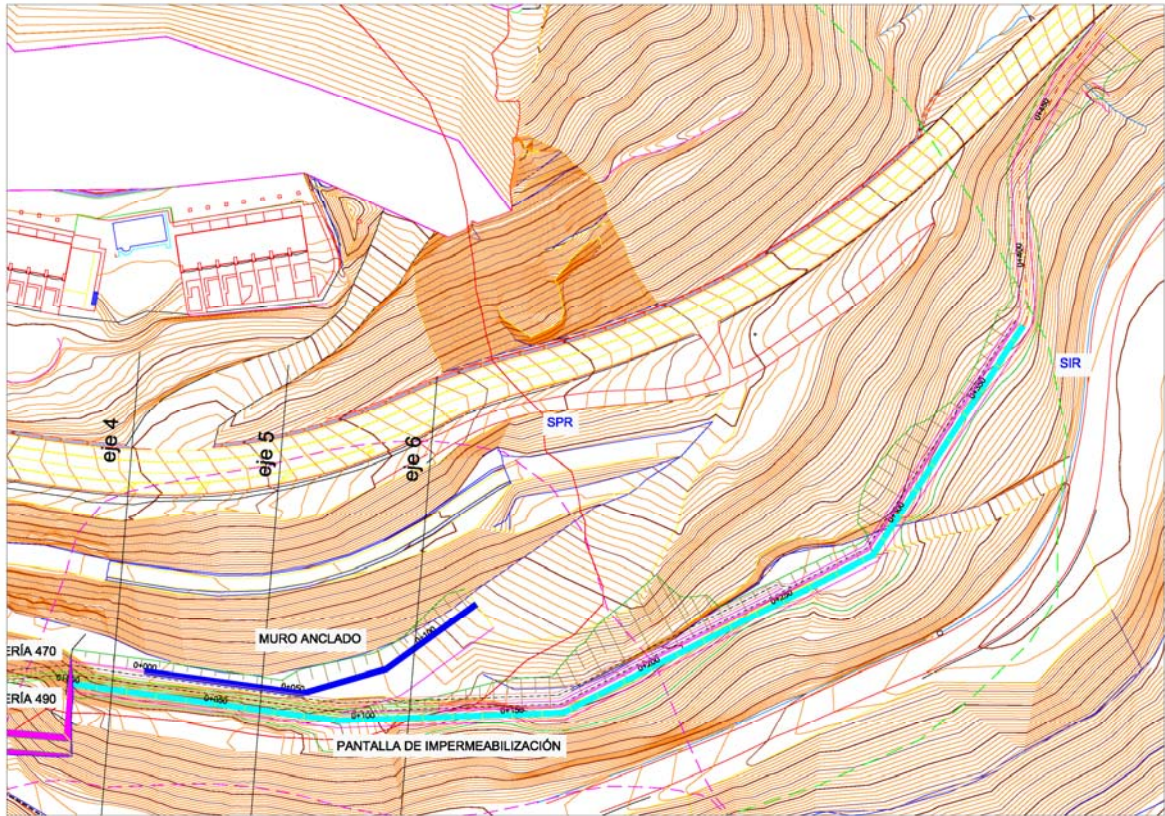


Figura 3.38: Planta topográfica del alcance de la pantalla de impermeabilización que se ejecutará aguas arriba de la presa actual, al pie de la ladera, desde la cota 516. Puede verse el muro anclado que tendrá que construirse para protección de la coronación de la pantalla y estabilización del sector de talud afectado por el Deslizamiento del Inglés.

Seguidamente, en las figuras 3.39 a 3.54, se muestran una serie de imágenes referentes al estado de las obras de excavación de la ladera llevadas a cabo a finales de noviembre de 2013.



Figura 3.39: Vista hacia el E de la berma nº 7 y el banco nº 8. Coronación de la excavación. La berma se encuentra revestida de zahorra y se han ejecutado las cunetas de berma y bajantes.



Figura 3.40: Vista hacia el Oeste de la berma nº 6 y los bancos nº 6, nº 7 y nº 8.



Figura 3.41: Vista hacia el Oeste de la berma nº 5 en primer término y los bancos nº 5 y nº 6.



Figura 3.42: Vista hacia el Este de la berma nº 5 en la que se produjo un deslizamiento a favor de un repliegue local durante la excavación.



Figura 3.43: Detalle de la estabilización del deslizamiento local que tuvo lugar en la berma nº 5 mediante el cosido de los estratos con bulones de barra de acero.



Figura 3.44: Vista hacia el Oeste de las bermas nº 3 y nº 4, y de los bancos nº 3 y nº 4, los cuales se ven afectados por un proceso de inestabilidad superficial.



Figura 3.45: Detalle de la berma nº 4 hacia el Oeste donde se sitúa la coronación de un deslizamiento superficial que afecta a los bancos nº 3 y nº 4 (entre las bermas nº 2 y nº4).



Figura 3.46: Detalle de la berma nº 4 hacia el Este, donde se sitúa la coronación del deslizamiento superficial observado.



Figura 3.47: Vista hacia el Oeste donde se observa en el centro de la imagen la berma nº 3, así como los bancos nº 3 y nº 4.



Figura 3.48: Vista de la masa de 90.000 m³ de terreno situada al pie de la excavación, pendiente de ser eliminada una vez sea trasladada la torre eléctrica.



Figura 3.49: Vista de la berma nº 3 hacia el Este, la cual se ve afectada por un deslizamiento somero desarrollado tras la excavación, a favor de una zona de mayor alteración.



Figura 3.50: Vista de las bermas nº 2 y nº 3 hacia el E, donde se observa el alcance completo del deslizamiento superficial.



Figura 3.51: Entrada a una cavidad de tamaño métrico generada en el límite Oeste de la masa inestable delimitada por las superficies de rotura SPR y SIR.



Figura 3.52: Interior de la cavidad de tamaño métrico generada en el límite Oeste de las masas inestable SPR y SIR. Sus dimensiones parecen indicar que el movimiento ocurrido recientemente debía ser la reactivación de un deslizamiento anterior, dado que no se ha registrado tanta deformación recientemente.



Figura 3.53: Vista de las bermas nº 1 y nº 2 hacia el E. Se observa el fondo de la excavación y los bancos nº 1 y nº 2. Puede verse la masa de terreno de 90.000 m³ pendiente de ser retirada cuando se traslade la torre eléctrica.



Figura 3.54: Vista del fondo de la excavación situado aguas arriba de las Urbanizaciones Lasaitasuna y Mirador de Yesa. Se observa la plataforma resultante de grandes dimensiones que ha permitido la eliminación de toda la parte superior de la masa afectada por la SPR y una gran descarga de la cabecera de la masa afectada por la SIR.

Por lo visto sobre el terreno y tras el seguimiento de la auscultación topográfica e inclinométrica, puede decirse que el movimiento de la ladera se ha detenido por completo, puesto que en los inclinómetros no se detecta movimiento asociado a las dos superficies de rotura CPR y SIR, tal y como se muestra en la figura 3.55 que se presenta a continuación.

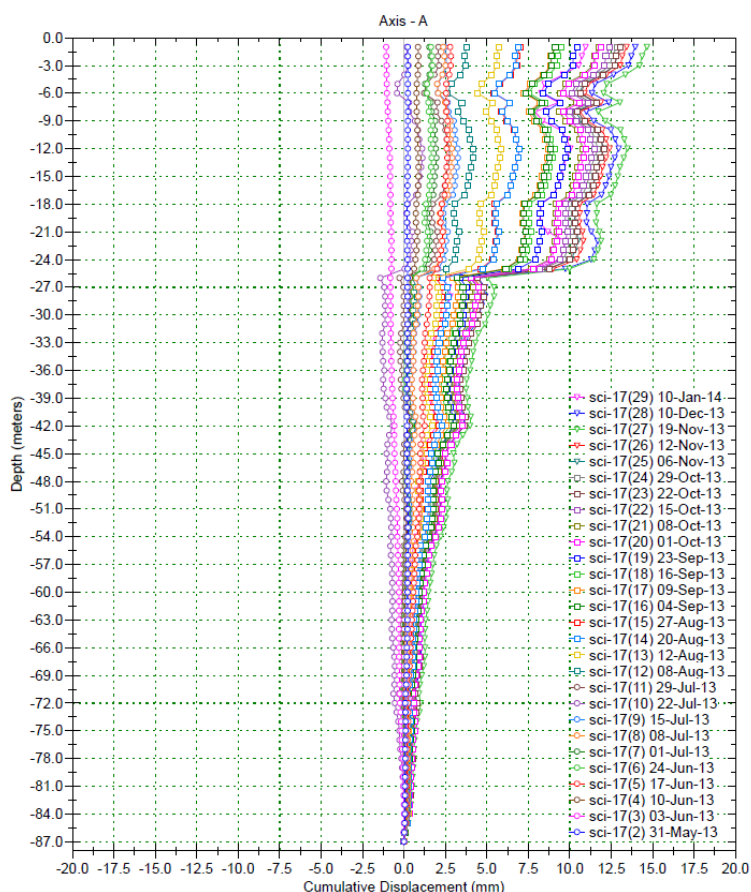


Figura 3.55: Gráfica de seguimiento del inclinómetro SCI-17 situado en el eje 2, entre las dos presas, bajo la carretera N-240, en la que se observa como las últimas lecturas de diciembre de 2013 y enero de 2014 no son las que presentan mayor desplazamiento, lo que indica que los movimientos se han detenido en este sector de la ladera.

Sí se observa, sin embargo, movimiento asociado a la zona del Deslizamiento del Inglés, el cual será estabilizado mediante la ejecución de un muro anclado y el descabezado de la coronación de la parte sumergida, lo que contribuirá notablemente a mejorar su estabilidad.

En este caso, ni el movimiento de tierras realizado ni la ejecución de los muros-jardinera, afectan al deslizamiento del Inglés, que sigue, por lo tanto, con su dinámica habitual desde hace décadas, que consiste en manifestar pequeños movimientos con los sucesivos desembalses.

4. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

4.1. INTRODUCCIÓN

En el presente apartado se muestran los resultados obtenidos en los análisis de estabilidad efectuados en la ladera de la margen derecha del Embalse de Yesa. En ellos se reproducen las condiciones originales de la ladera cuando se detectó el proceso de inestabilidad, comparándose con la situación actual, una vez realizada la excavación de la misma, y con las condiciones futuras, cuando se construya la nueva presa.

En este apartado se llevan a cabo análisis de estabilidad de la ladera en diferentes supuestos e hipótesis, reproduciendo el desplazamiento observado en el terreno, estudiando las causas de los movimientos detectados, la eficacia de las medidas de estabilización que se están llevando a cabo y su posible optimización.

La zona de estudio corresponde a la ladera derecha de la presa, en la zona de la cerrada, donde se observaba la presencia de dos grandes masas inestables superpuestas, que afectan a una superficie de 24-25 hectáreas, cuya presencia se ha puesto de manifiesto en 2012-2013. Hasta entonces no se tenían indicios de su presencia o actividad.

Así mismo destaca la existencia de un deslizamiento menor, de carácter rotacional, que afecta a una superficie de 0,40 hectáreas aguas arriba de la presa actual y que se encuentra sumergido en su mayor parte (deslizamiento del Inglés).

En la figura 4.1 que se muestra a continuación puede verse la localización de las secciones de análisis consideradas para la realización de los análisis de estabilidad. El perfil 1 se sitúa alineado con la coronación de la nueva presa, el perfil 2 equidistante entre las dos presas, el perfil 3 siguiendo el eje de la presa actual y el perfil 5 aguas arriba de la presa actual, discurriendo por el centro del deslizamiento del Inglés.

En la figura 4.2 se presenta una vista frontal de la ladera objeto de estudio, en la que se observa el avance de las actuaciones de estabilización del terreno que se están llevando a cabo (excavaciones en coronación y peso estabilizador al pie a base de muros-jardinera). La eficacia de dichas actuaciones se analiza a continuación.

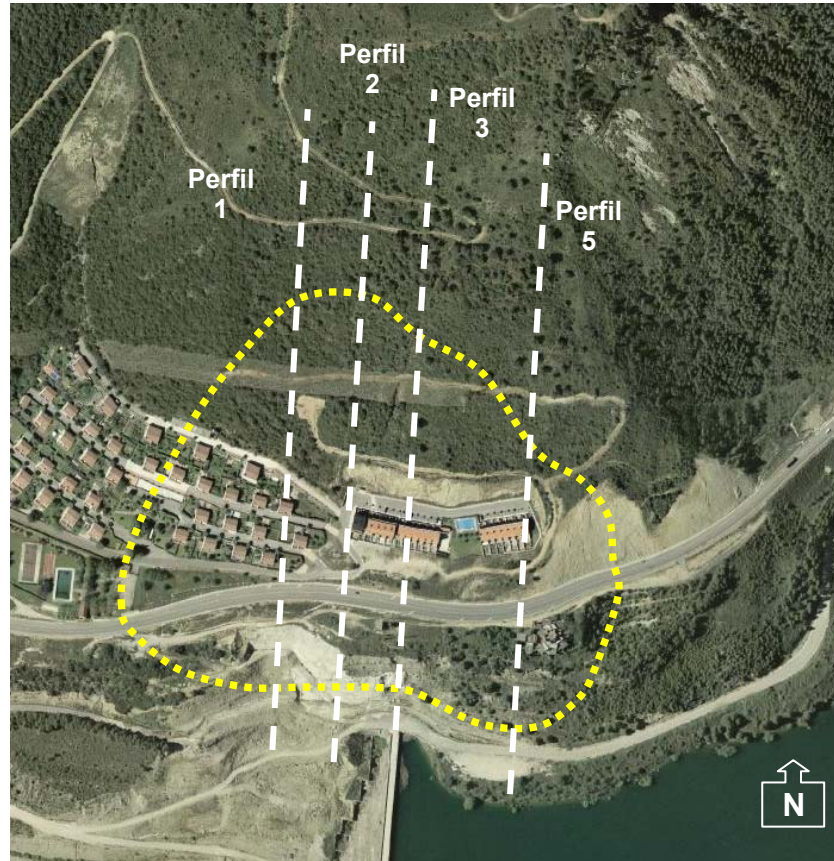


Figura 4.1: Ortofoto de la ladera derecha de Yesa (visor IDENA Gob. de Navarra) en la situación anterior al inicio de las obras de estabilización de la ladera. En amarillo se muestra la zona afectada por el desplazamiento principal del terreno (superficie de rotura principal SPR). En esta zona se ha analizado la estabilidad de la ladera mediante las 4 secciones de análisis que se muestran.



Figura 4.2: Vista frontal de la ladera en la que se han llevado a cabo los análisis de estabilidad que a continuación se exponen. Situación de las obras de estabilización a finales de noviembre de 2013.

En los apartados anteriores se delimitaba el alcance de las zonas afectadas por los procesos de inestabilidad y se describían sus características. Con dicha información, junto con las observaciones de campo, estudio de fotografía aérea, fotografía terrestre, resultados de sondeos e inclinómetros, estudio de antecedentes, etc., se ha procedido a realizar análisis específicos sobre las condiciones de estabilidad de la ladera.

Con los análisis de estabilidad se estudian todas las situaciones que pueden plantearse en la ladera y se evalúa la eficacia de las actuaciones en ejecución, sin contar con el efecto estabilizador o “efecto contrafuerte” que supondrá la nueva presa para la ladera. Se pretende además, con estos análisis, la consecución del máximo rendimiento posible para dichas actuaciones, estudiando, en esta fase también, posibles optimizaciones de las mismas.

Por lo tanto se trata de evaluar las condiciones actuales de estabilidad de la ladera y hacer una previsión de su comportamiento a largo plazo, desde el enfoque de analizar la situación de estabilidad futura y optimizar los recursos para su seguimiento y control.

4.2 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

Los cálculos de estabilidad de la ladera incorporados en el presente informe han sido realizados con el software SLIDE (versión 6.02) comercializado por la empresa Rocscience Inc. Este programa realiza el cálculo de estabilidad según el método de equilibrio límite. Este método se basa únicamente en las leyes de la estática, es decir, no considera deformaciones. Además, el método supone que en el momento del deslizamiento se moviliza la resistencia al corte simultáneamente a lo largo de toda la superficie de rotura.

En este método se comparan las fuerzas desestabilizadoras frente a las resistentes a lo largo del plano de rotura. La comparación entre ellas proporciona un factor de seguridad (FS). La condición de equilibrio límite se alcanza cuando la magnitud de las fuerzas estabilizadoras es igual a la de las resistentes, alcanzándose así un FS de valor la unidad.

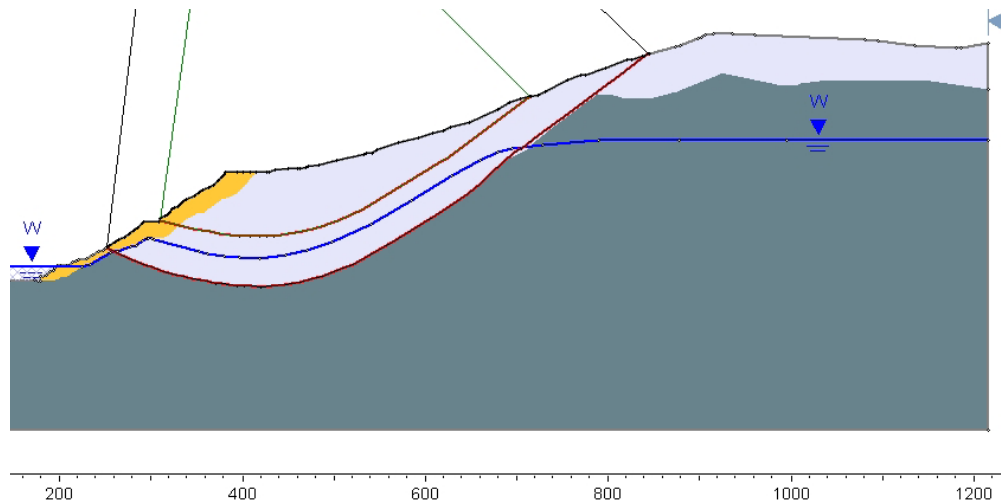
El método de cálculo utilizado considera un criterio de rotura de tipo Mohr Coulomb, en el que se considera la cohesión y el ángulo de rozamiento interno de los materiales involucrados. En el caso de las Margas de Pamplona, al presentar un comportamiento más propio de materiales rocosos y no verse en ningún caso afectadas por los procesos de inestabilidad estudiados, los parámetros de resistencia se le han asignado según el criterio de rotura de Hoek y Brown, considerando en este caso la resistencia a compresión simple y los parámetros m y s del material.

Las superficies de rotura analizadas en la ladera han sido definidas manualmente, reproduciendo los procesos de inestabilidades observadas en el terreno y registradas mediante inclinómetros. En este caso no se han llevado a cabo simulaciones mediante roturas circulares aleatorias, puesto que el condicionante estructural que presenta la ladera estudiada en este caso, es incompatible con la generación de dichas superficies. Ello equivaldría a considerar el material afectado por la inestabilidad (Flysch de Yesa) como un material isótropo y homogéneo. Esta situación solo tiene cabida en el caso de deslizamientos muy someros, en la superficie de excavaciones antrópicas, donde el material se presenta más descomprimido o alterado por exposición ambiental.

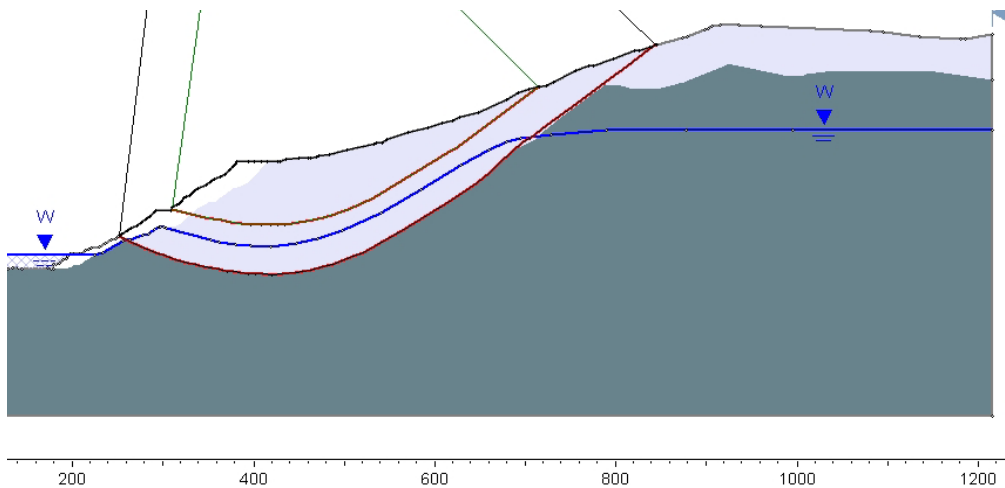
4.3 MODELOS GEOMÉTRICOS ANALIZADOS

Para llevar a cabo dicho análisis se ha estudiado la geometría de la ladera en función de los perfiles geológicos transversales más representativos. En este caso se consideran 4 perfiles de orientación N-S, que ascienden desde el valle del río Aragón (al S) hasta la coronación del relieve en Marmayor (al N):

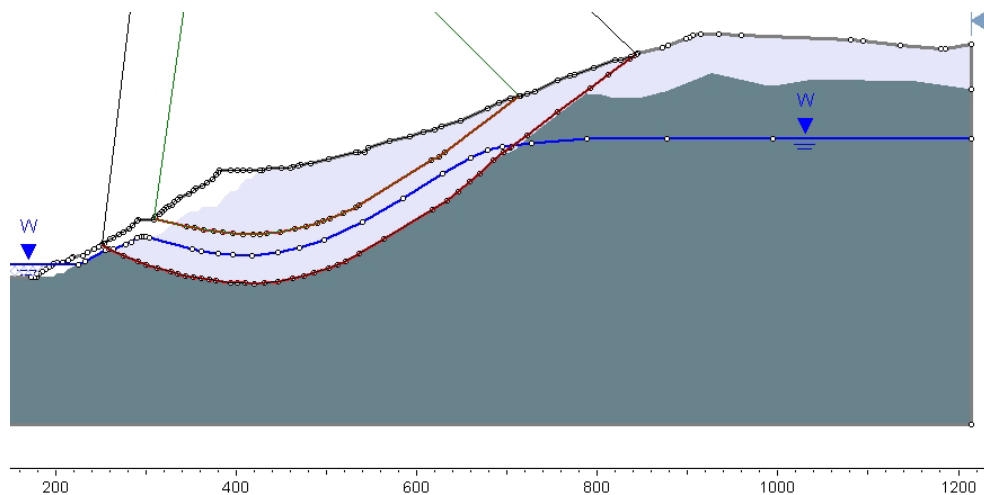
- Modelo geométrico 1: corresponde al perfil situado más al Oeste, aguas abajo de la presa actual. Discurre exactamente por el eje de la nueva presa en construcción. En este modelo geométrico se ha analizado la evolución de la ladera desde el año 2003 hasta la actualidad, así como la eficacia de las medidas de estabilización. Se han analizado simultáneamente dos superficies de rotura SPR y SIR.



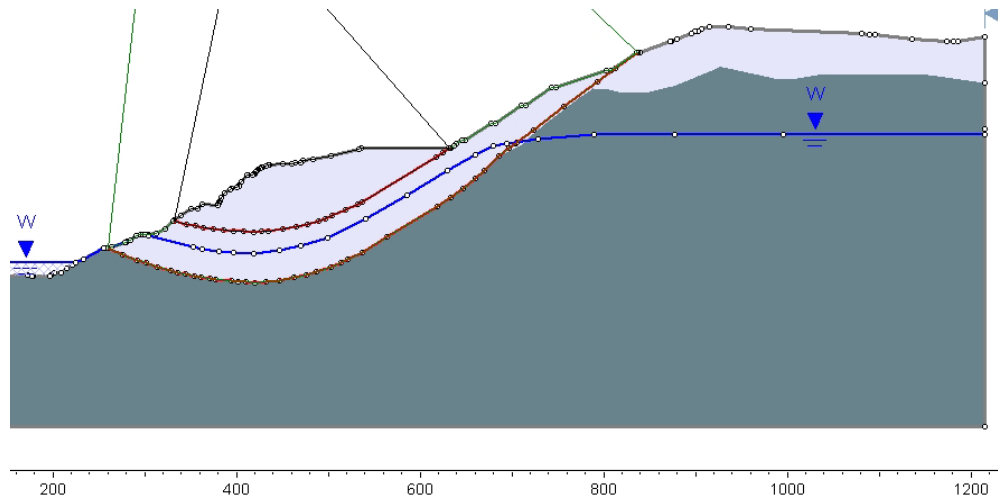
Modelo geométrico 1-1: Situación de la ladera anterior a 2003.



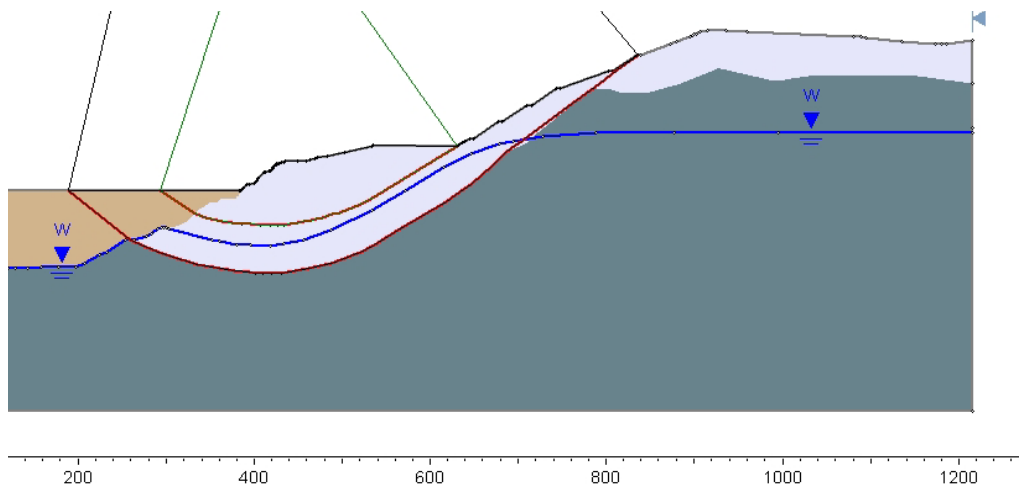
Modelo geométrico 1-2: Situación de la ladera anterior a 2011



Modelo geométrico 1-3: Situación de la ladera en 2013

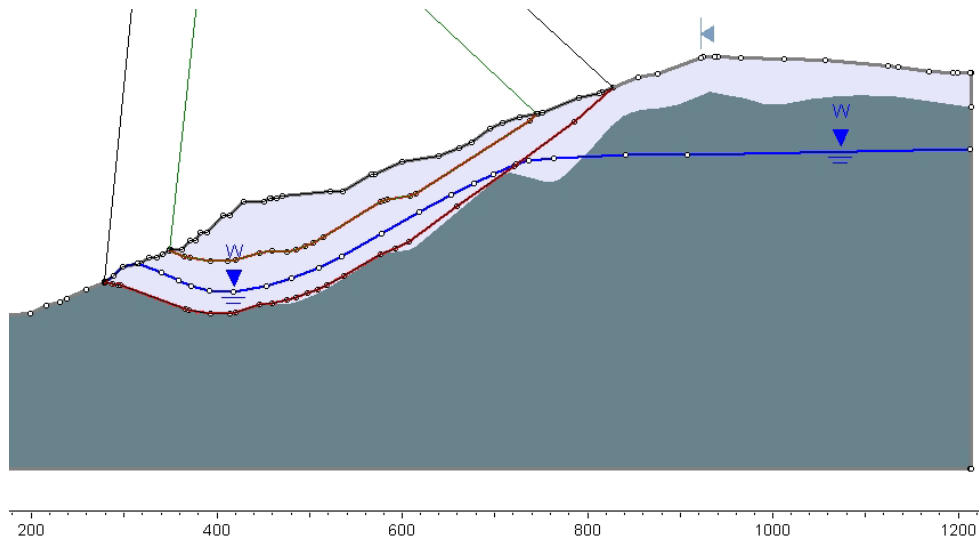


Modelo geométrico 1-4: Situación de la ladera en 2014 tras la excavación realizada

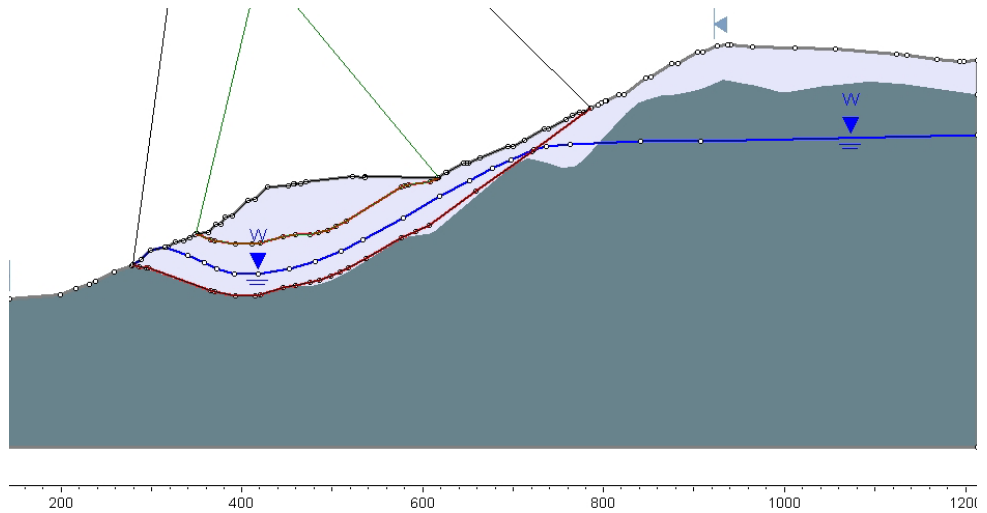


Modelo geométrico 1-4: Situación futura de la ladera tras la excavación realizada y la construcción de la nueva presa

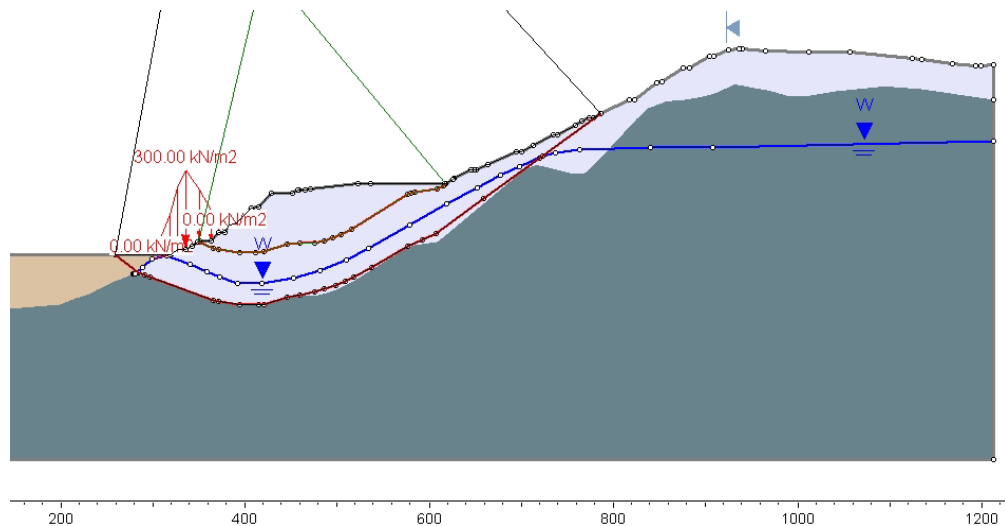
- Modelo geométrico 2: corresponde al perfil situado entre las dos presas, la actual y la presa en construcción. En este modelo geométrico se han analizado simultáneamente las dos superficies de rotura SPR y SIR, así como la eficacia de las medidas de estabilización. De forma complementaria se ha estudiado el efecto estabilizador adicional que supondría el espaldón de aguas arriba de la nueva presa, que se sitúa en este perfil a la cota 487, si bien no se tiene en cuenta a la hora de valorar la eficacia de la actuación realizada.



Modelo geométrico 2-1: Situación de la ladera en 2013.

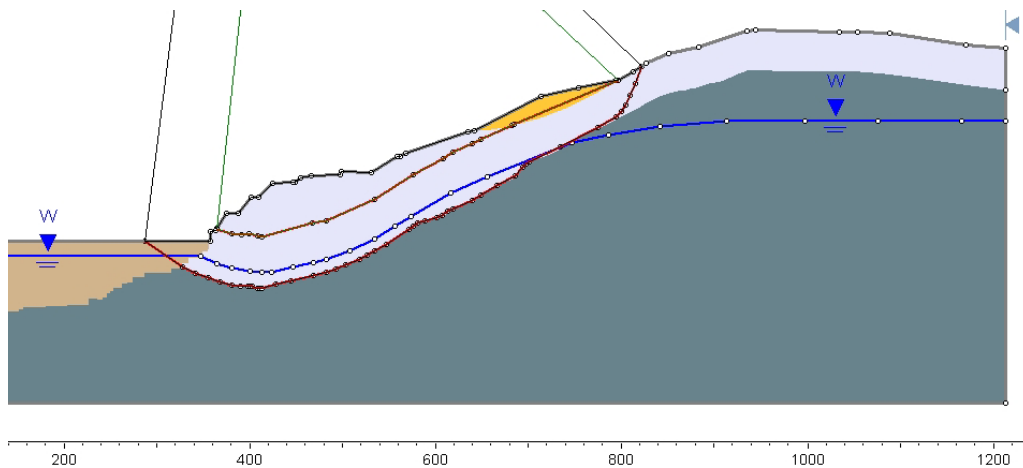


Modelo geométrico 2-2: Situación de la ladera en 2014 tras la excavación realizada.

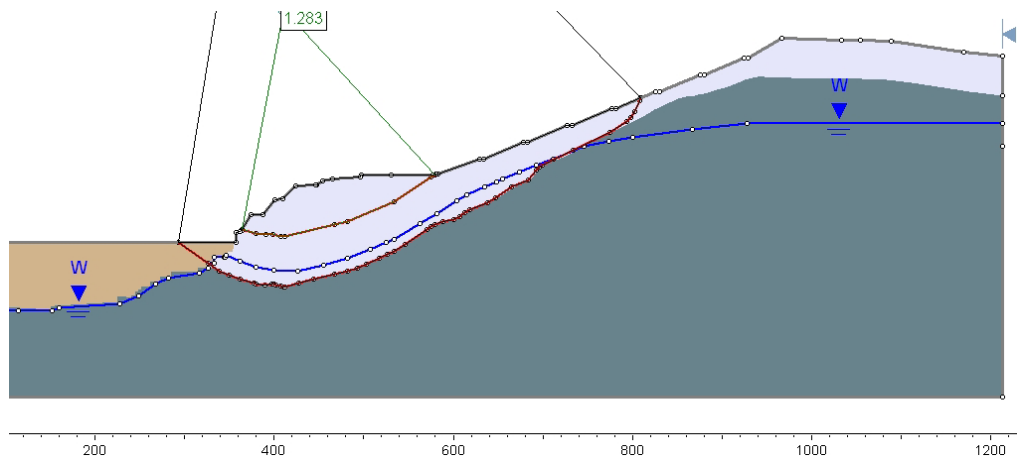


Modelo geométrico 2-3: Situación futura de la ladera con el espaldón de la nueva presa al pie y los muros-jardinera.

- Modelo geométrico 3: corresponde al perfil situado en el centro de la masa movilizada y discurre por el eje de la presa actual. En este caso se han analizado simultáneamente las superficies de rotura SPR y SIR, la eficacia de la excavación realizada, el efecto estabilizador que representa la presa actual, las distintas situaciones de embalse y desembalse, etc.

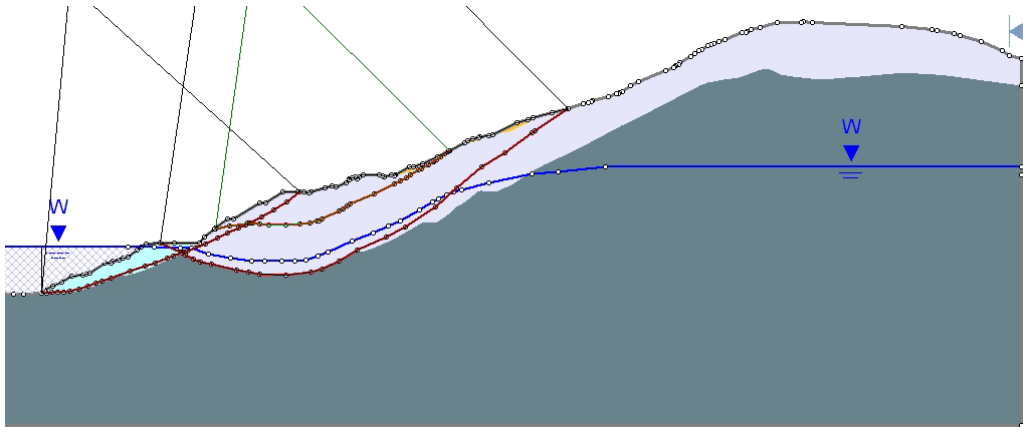


Modelo geométrico 3-1: Situación de la ladera en 2013.

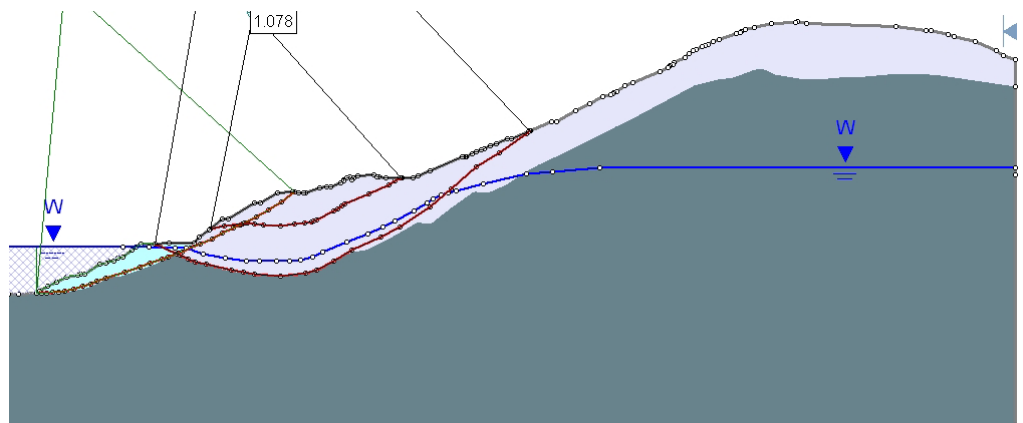


Modelo geométrico 3-2: Situación de la ladera en 2014 tras la excavación realizada.

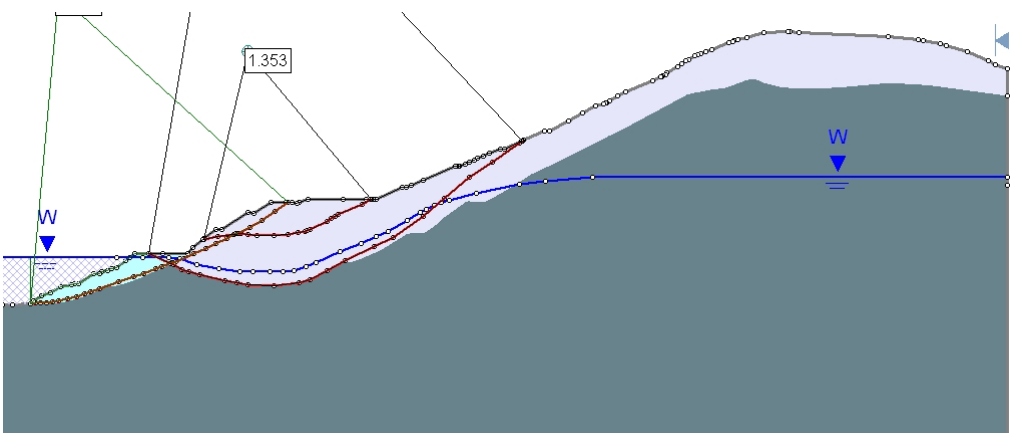
- Modelo geométrico 5: El modelo geométrico 5 corresponde al perfil situado más al Este de los analizados. Corresponde al Perfil Geológico nº 5. Discurre aguas arriba de la presa actual, pasando por el centro del deslizamiento rotacional conocido desde 1960 como “deslizamiento del Inglés”. En este modelo geométrico se han estudiado simultáneamente las condiciones de estabilidad de la SPR, SIR y el Deslizamiento del Inglés, analizado la eficacia de las medidas de estabilización que se están aplicando y estudiándose varias alternativas para la mejora de la estabilidad de los tres movimientos.



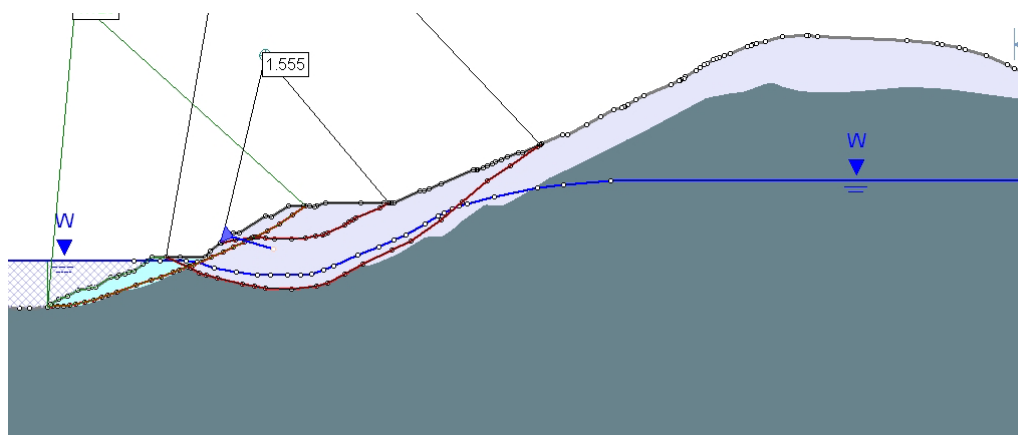
Modelo geométrico 5-1: Situación de la ladera en 2013.



Modelo geométrico 5-2: Situación de la ladera en 2014 tras la excavación realizada.



Modelo geométrico 5-3: Excavación complementaria en la zona del Mirador de Yesa.



Modelo geométrico 5-4: Excavación complementaria en la zona del Mirador de Yesa y muro anclado para la estabilización de la parte emergida del deslizamiento del Inglés en el entorno de la pantalla de impermeabilización.

4.4 PARÁMETROS DE CÁLCULO

Las unidades geológicas distinguidas en las secciones de análisis se han tomado en función de los datos de los sondeos mecánicos disponibles en la ladera, los resultados de los inclinómetros, las cartografías geológicas previamente elaboradas y perfiles geológicos.

En los análisis de estabilidad se han considerado distintos denominados como: Margas de Pamplona, Flysch de Yesa, plano de deslizamiento, depósitos coluviales, masa deslizada (deslizamiento del Inglés, perfil nº5), presa actual de hormigón, presa de tierras, etc.

No se han considerado depósitos de flysch o margas alterados, a la vista del escaso espesor del horizonte de alteración en esta ladera.

Parámetros geomecánicos

Los parámetros geomecánicos asignados a los materiales en los análisis de estabilidad son los que se exponen a continuación en los cuadros 4.1 y 4.2

CUADRO 4.1
Parámetros geomecánicos de los materiales (1)

MATERIALES	DENSIDAD γ (KN/m ³)		UCS (kPa)	m	s	SATURACIÓN
	NAT.	SAT.				
Margas de Pamplona	23	24	35.000	0,194	0,000345	N.F.

CUADRO 4.2
Parámetros geomecánicos de los materiales (2)

MATERIALES	DENSIDAD γ (KN/m ³)		COHESIÓN C (KN/m ²)	ϕ (°)	SATURACIÓN
	NAT.	SAT.			
Flysch de Yesa (*)	22	23	0	18-19°	N.F.
Deslizamiento del Inglés.	19	21	0	28°	N.F.
Plano de deslizamiento SPR (**)	22	23	0	16-17°	Ru=0.04-0.06
Presa de hormigón actual	24	--	400	40°	--
Nueva presa de tierras	22	--	10	32°	--

(*) En los depósitos del Flysch de Yesa los parámetros corresponden al plano de rotura inferior SIR a favor del cual se produce el desplazamiento del terreno. El conjunto de la unidad litológica (areniscas y margas) tiene unos parámetros geomecánicos claramente superiores si no se considera movimiento a favor de la estratificación).

(**) Al plano de rotura principal SPR se le han asignado unos parámetros diferentes a los del Flysch, al encontrarse este por encima del área de influencia del nivel freático pero observarse una cierta presencia de agua en los puntos en los que aflora. Además, durante la excavación se han producido inestabilidades locales con buzamientos de los estratos de 15-17°.

Se han considerado unos parámetros representativos de los materiales en función de su naturaleza, parámetros tomados de estudios anteriores, resultados de laboratorio, observaciones in situ, etc., los cuales se han ajustado posteriormente a la realidad del terreno al reproducir, mediante análisis retrospectivo (back analysis), los movimientos que se han observado en la ladera entre 2012 y 2013.

Saturación del terreno

En el caso de la superficie de rotura inferior SIR el grado de saturación del terreno se ha simulado mediante el nivel freático que se observa en la ladera, el cual, por cierto, es bastante insensible a las oscilaciones del nivel de embalse en la situación actual.

En el caso de la superficie de rotura principal SPR la saturación del terreno se ha reproducido mediante el parámetro de presión de poros Ru, que supone una relación entre la densidad del agua (10 KN/m³) y la de los materiales (22 KN/m³) en función del porcentaje de saturación. Así, a un suelo con densidad 20 KN/m³ se le asignaría un valor de Ru=0,5 en saturación total. Este valor podría ser superior a 0,5 solo en el caso de presiones intersticiales mayores a las que las correspondientes a la posición topográfica dentro de la zona saturada (acuíferos confinados).

En la ladera objeto de análisis no se ha detectado nunca la presencia de agua en el terreno, salvo el nivel freático que se observa bajo la SPR, ni en los sondeos mecánicos ni a modo de surgencias en los taludes del pie de la ladera, excepción hecha de algunas afluencias puntuales asociadas al plano de rotura. Tampoco se ha detectado agua en el terreno durante la perforación de los elementos de anclaje presentes en algunos sectores del talud.

Sin embargo el movimiento del terreno observado ha sufrido los mayores desplazamientos (dentro de la escasa magnitud de los mismos), tras unos episodios de fuertes precipitaciones en la zona, o al menos una vez iniciado el movimiento se ha observado una cierta correlación entre velocidad de desplazamiento y precipitaciones. Por ello se ha considerado necesario adoptar un cierto grado de saturación, aunque moderado, para reproducir las condiciones naturales de la ladera.

Aunque en el entorno de la SPR no se haya detectado en la ladera nunca la presencia de agua, es posible que en el plano de discontinuidad (que discurre íntegramente por los depósitos de flysch), haya podido darse un cierto grado de saturación que haya provocado una determinada presión de poros que favorezca el movimiento del terreno. Esta afirmación concuerda con la presencia de las afluencias puntuales de agua comentadas.

El grado de saturación considerado para la superficie de rotura principal SPR es de $R_u=0.04-0.06$, equivalente a una saturación del 10-15%.

Acción sísmica

En los análisis se ha tenido en cuenta también el efecto de la acción sísmica. En el caso de los análisis pseudoestáticos realizados, se ha considerado la fuerza que ejerce una aceleración distinta a la gravedad sobre la masa deslizada. La aceleración sísmica se ha simulado en los análisis aplicada en sentido horizontal y vertical.

Dichos valores han sido obtenidos a partir de la aceleración pico del terreno (PGA) considerados para el propio diseño de la presa, transformados según las normas del Eurocodigo-8 y la NCSE-02, en el que la aceleración sísmica horizontal de cálculo (a_h) se toma como $\frac{1}{2}$ de la PGA, y a su vez la aceleración vertical (a_v) se considera como 0,7 de la a_h . Esta reducción del 50% obedece a que la aceleración pico (PGA) no es representativa

del efecto que un terremoto puede tener sobre una ladera de estas dimensiones, dado que la duración de esta fase del acelerograma suele ser instantánea y el efecto de un sismo sobre un elemento de estas dimensiones depende más del conjunto del “movimiento fuerte”.

De acuerdo con la normativa de presas vigente, la presa de Yesa constituye una gran presa de Categoría A localizada en una zona de sismicidad media. El diseño sismorresistente de la presa debe garantizar la operatividad de la presa para el caso de una acción sísmica de periodo de retorno 1.000 años y la seguridad total para el caso de una acción sísmica de periodo de retorno de al menos 3.000 años. Este criterio es aplicable también a la estabilidad de las laderas.

Estos dos escenarios sísmicos seleccionados corresponden al terremoto de periodo de retorno PR=1.000 años o OBE (Operating Basis Earthquake) y el de PR=3.000-5.000 años o SSE (Safe Shutdown Earthquake). Estos terremotos se conocen como el Terremoto de Operatividad de la presa y el Terremoto de Parada Segura.

Actualmente está en vigor la Norma Sismorresistente NCSR-02 en la que se especifica un valor de aceleración sísmica básica (a_b) de 0,04 g. No obstante, los valores de PGA considerados en este análisis han sido obtenidos del estudio de peligrosidad sísmica específico del Proyecto de la Presa. Se han considerado 3 supuestos sobre la ladera una vez finalizadas las obras de estabilización que se están llevando a cabo:

- Ladera sin sismicidad.
- Terremoto de diseño, cuyo periodo de retorno es de 1.000 años, al que corresponde una aceleración de 0,072g ($K_h=0.036g$ y $K_v=0.025g$).
- Terremoto extremo, con periodo de retorno 5.000 años, para el que se considera una aceleración de 0,135g ($K_h=0.067g$ y $K_v=0.047g$).

En los análisis de estabilidad se ha considerado la combinación de los distintos grados de saturación del terreno y actuaciones de estabilización de la ladera, con el terremoto de diseño (condiciones accidentales) y el terremoto extremo (condiciones extremas).

4.5 DESARROLLO DE LOS ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Se han llevado a cabo análisis específicos que han permitido reproducir los movimientos del terreno registrados en la ladera y evaluar la eficacia de las actuaciones que se están llevando a cabo.

4.5.1 MODELO GEOMÉTRICO 1: PERFIL N°1

Resultados de los análisis

Partiendo de la situación de equilibrio límite de 2013 (FS=1.00), se han simulado las condiciones de estabilidad de la ladera con anterioridad a 2003, fecha en la que se llevaron a cabo importantes excavaciones en el pie de la ladera para el emplazamiento de la nueva presa; y entre 2003 y 2011, pues a partir de 2011 se llevó a cabo un retaluzado de la margen derecha para regularizar e impermeabilizar el talud. También se analiza la eficacia de las actuaciones actualmente en ejecución y se estudian optimizaciones de la solución.

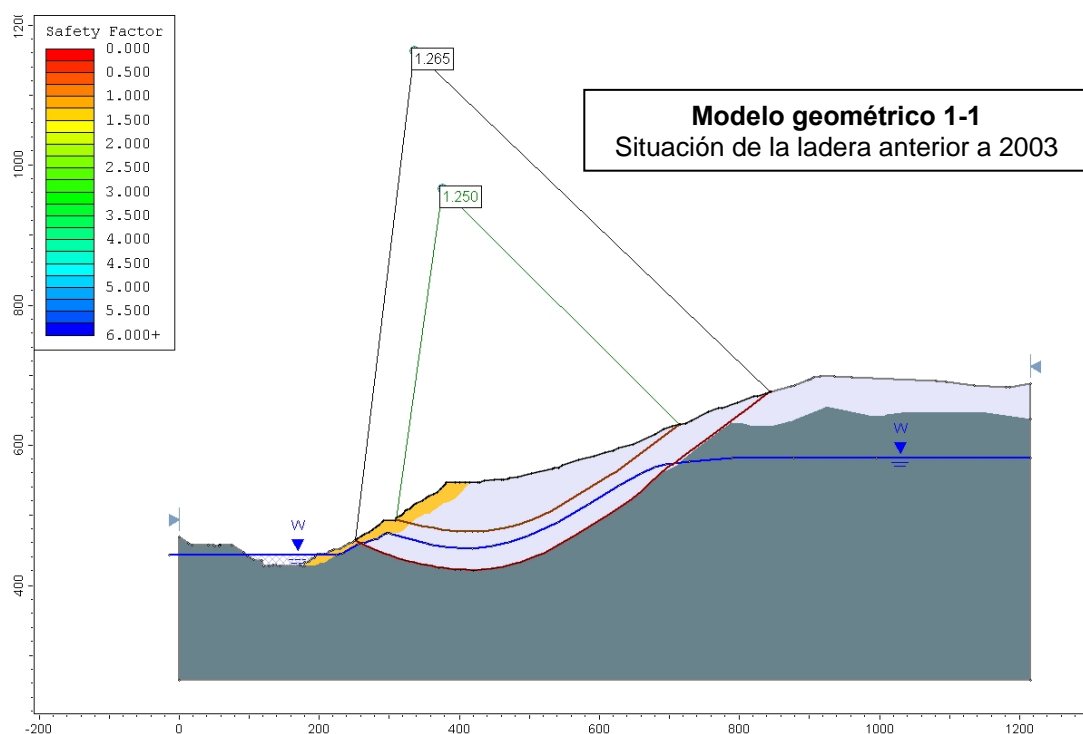


Figura 4.3: Situación de la ladera anterior a 2003. Ladera intacta antes de las excavaciones para la cimentación de la nueva presa. FS= 1.250 para la SPR y FS= 1.265 para la SIR. En aquel momento no se tenían evidencias de estos movimientos del terreno.

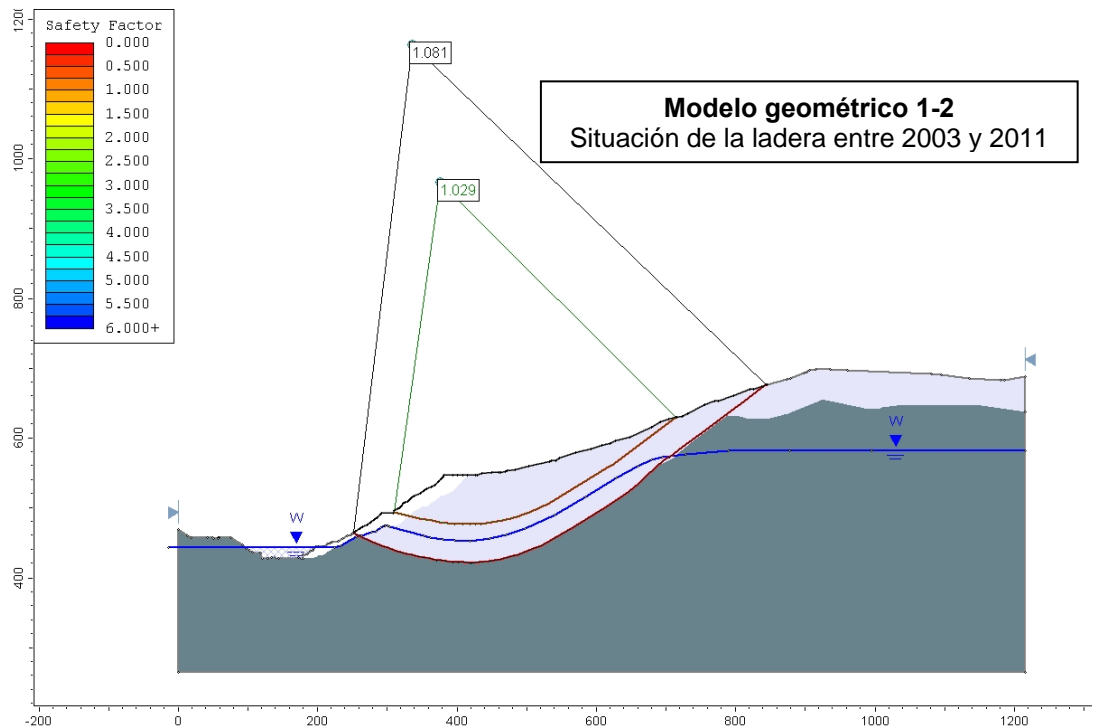


Figura 4.4: Situación de la ladera entre 2003 y 2011. Ladera tras las excavaciones para la cimentación de la nueva presa y anterior al reciente retaluzado. FS= 1.029 para la SPR y FS= 1.081 para la SIR. A pesar de que la ladera debía encontrarse en una situación de equilibrio estricto, no se manifestaron evidencias del proceso de inestabilidad recientemente detectado.

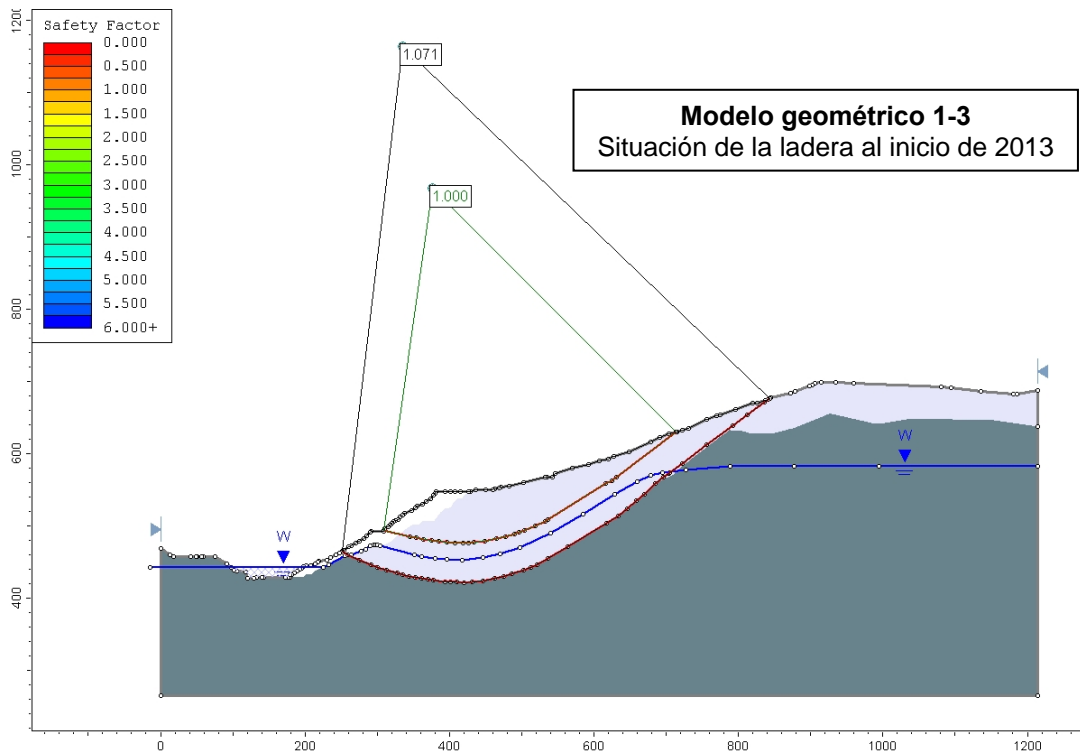


Figura 4.5: Situación de la ladera actual al inicio de 2013, antes del comienzo de las obras de estabilización en curso. FS= 1.000 (equilibrio límite) para la SPR y FS= 1.071 para la SIR. Situación en la que se detecta el movimiento en la ladera.

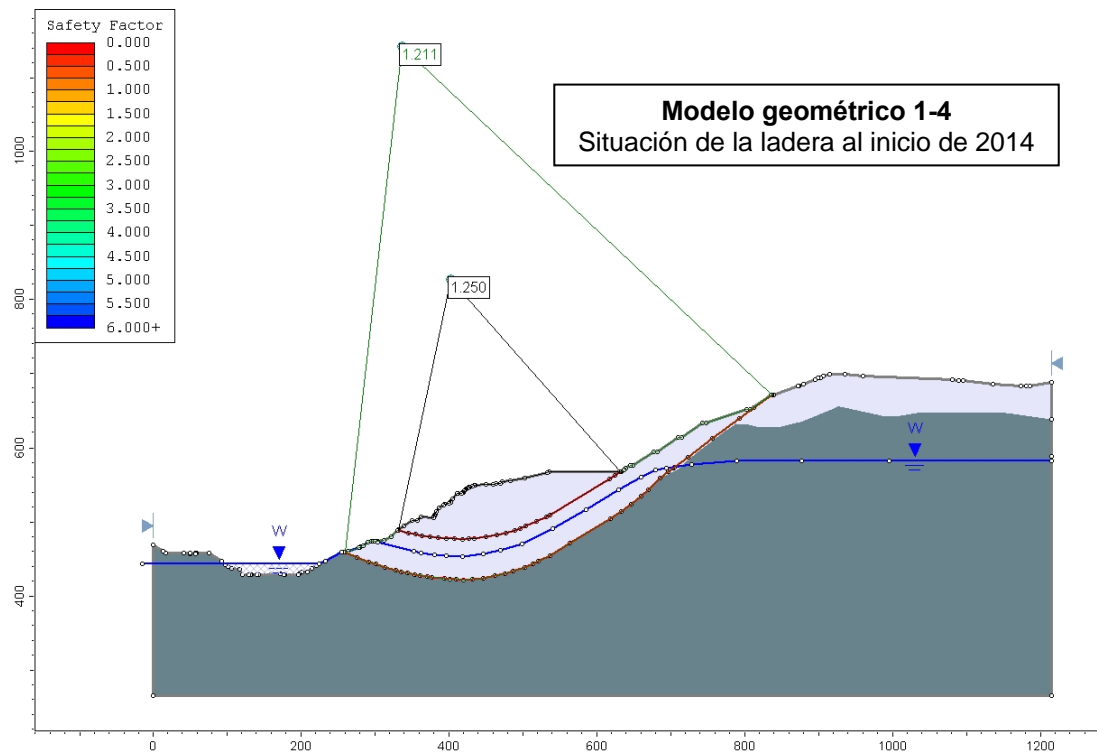


Figura 4.6: Situación tras la excavación realizada en la parte superior de la ladera. FS= 1.250 para la SPR y FS= 1.211 para la SIR. El factor de seguridad, sin tener en cuenta el efecto estabilizador adicional de la nueva presa, retorna a niveles de la situación original de la ladera.

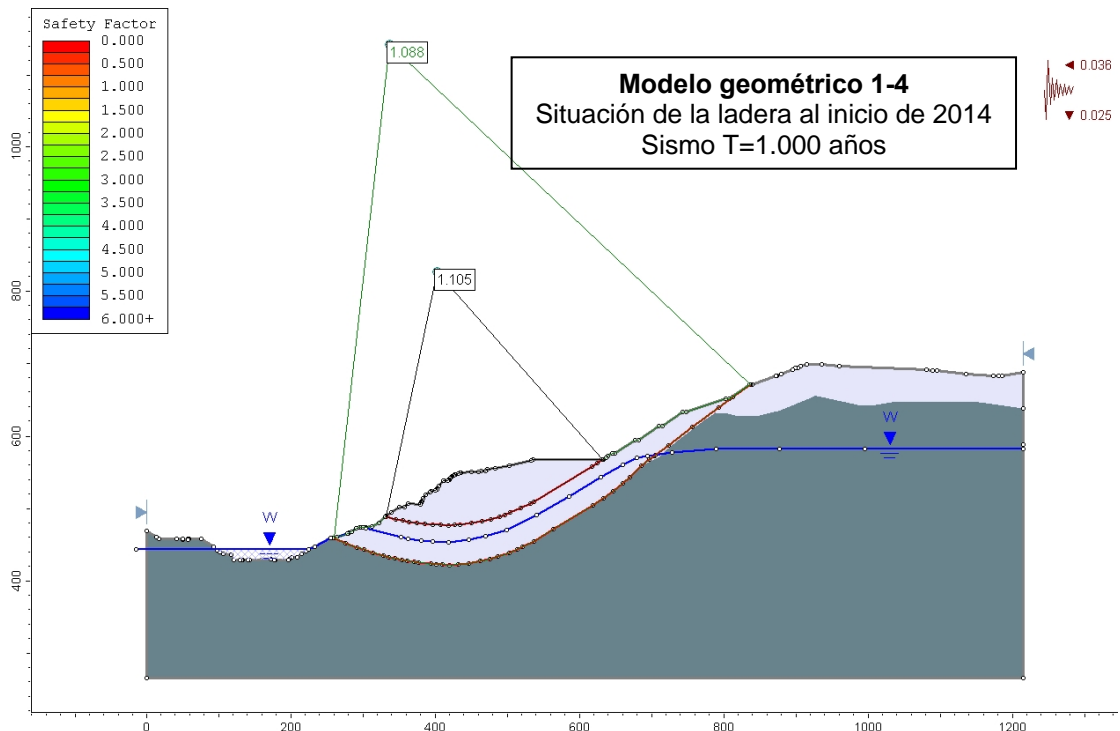


Figura 4.7: Situación tras la excavación realizada en la parte superior de la ladera considerando las condiciones accidentales (sismo de 1000 años). FS= 1.105 para la SPR y FS= 1.088 para la SIR.

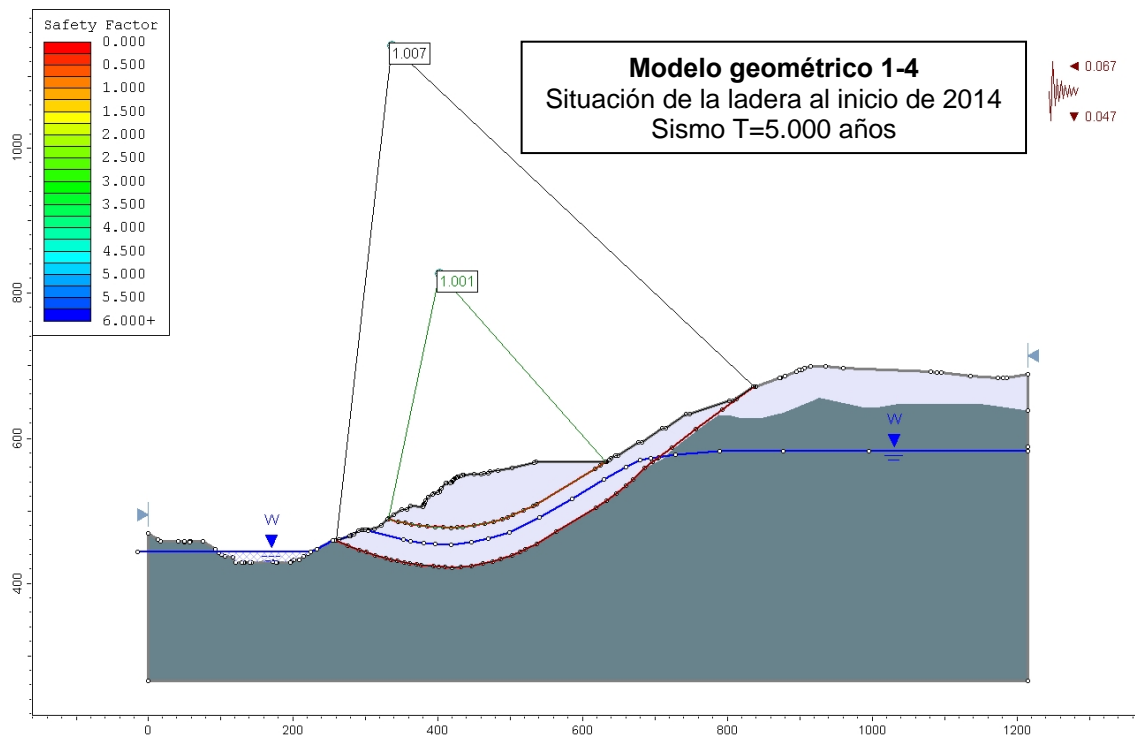


Figura 4.8: Situación tras la excavación realizada en la parte superior de la ladera considerando las condiciones extremas (sismo de 5000 años). FS= 1.001 para la SPR y FS= 1.007 para la SIR.

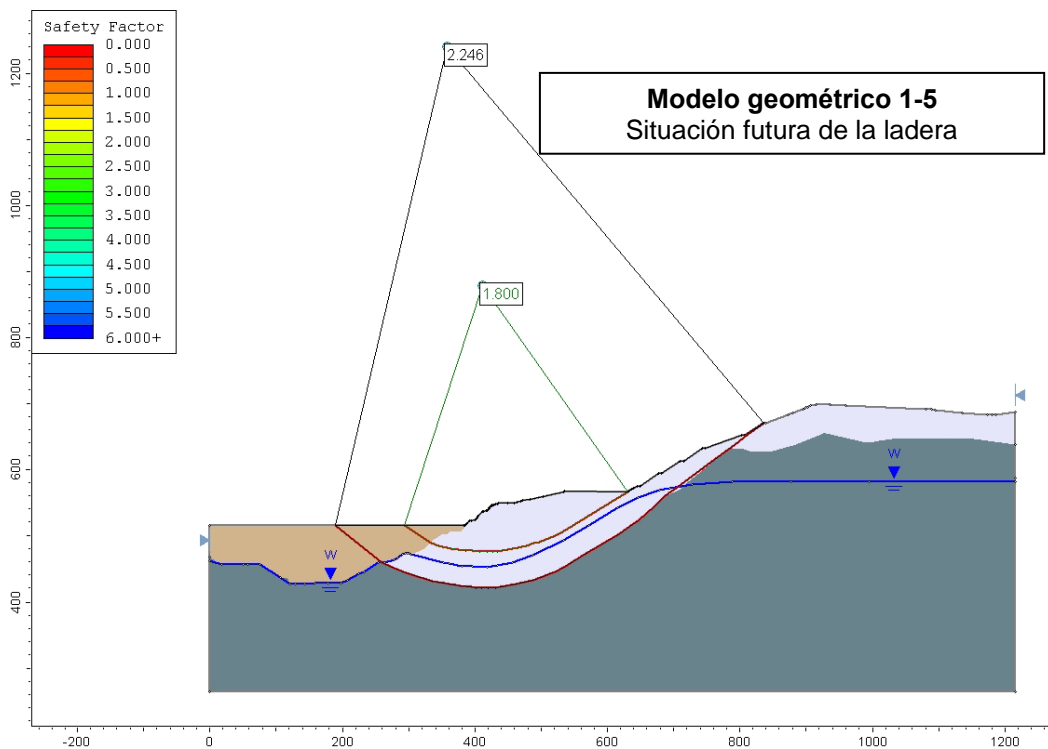


Figura 4.9: Situación tras la excavación realizada en la parte superior de la ladera y la construcción de la nueva presa. FS= 1.800 para la SPR y FS= 2.246 para la SIR. El factor de seguridad del conjunto ladera-presa es muy elevado para esta sección de análisis concreta.

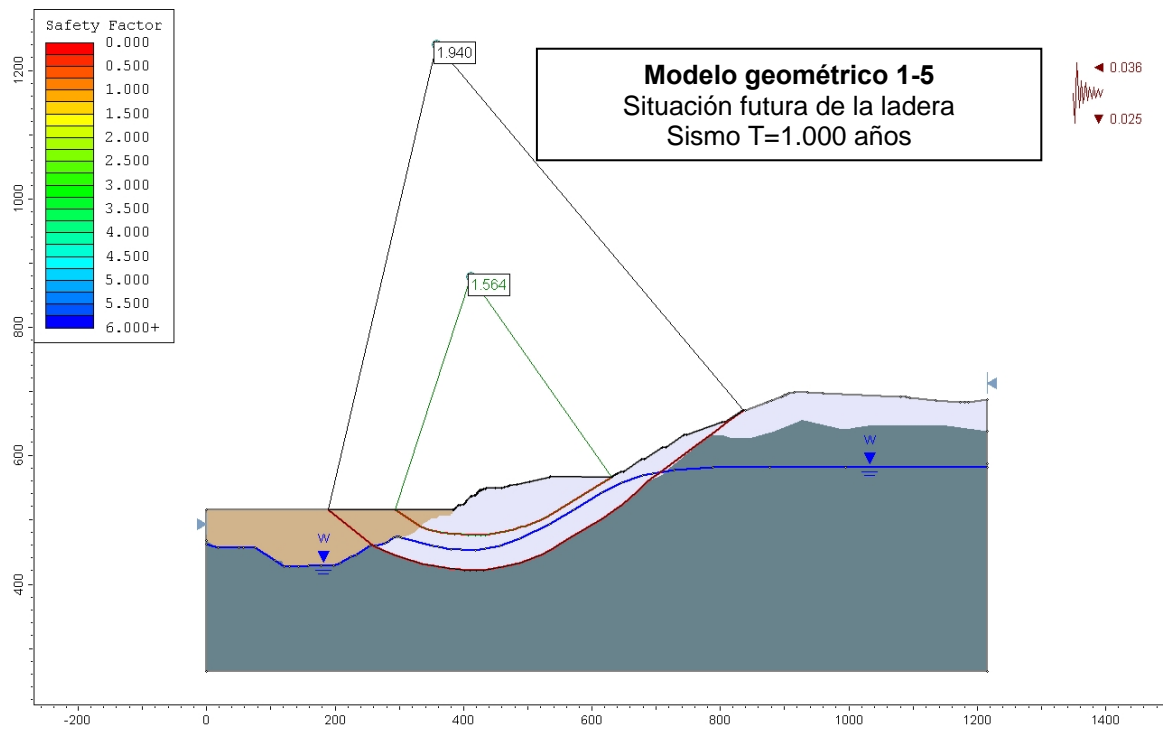


Figura 4.10: Situación tras la excavación realizada en la parte superior de la ladera y la construcción de la nueva presa, considerando las condiciones accidentales (sismo de 1000 años). FS= 1.564 para la SPR y FS= 1.940 para la SIR. .

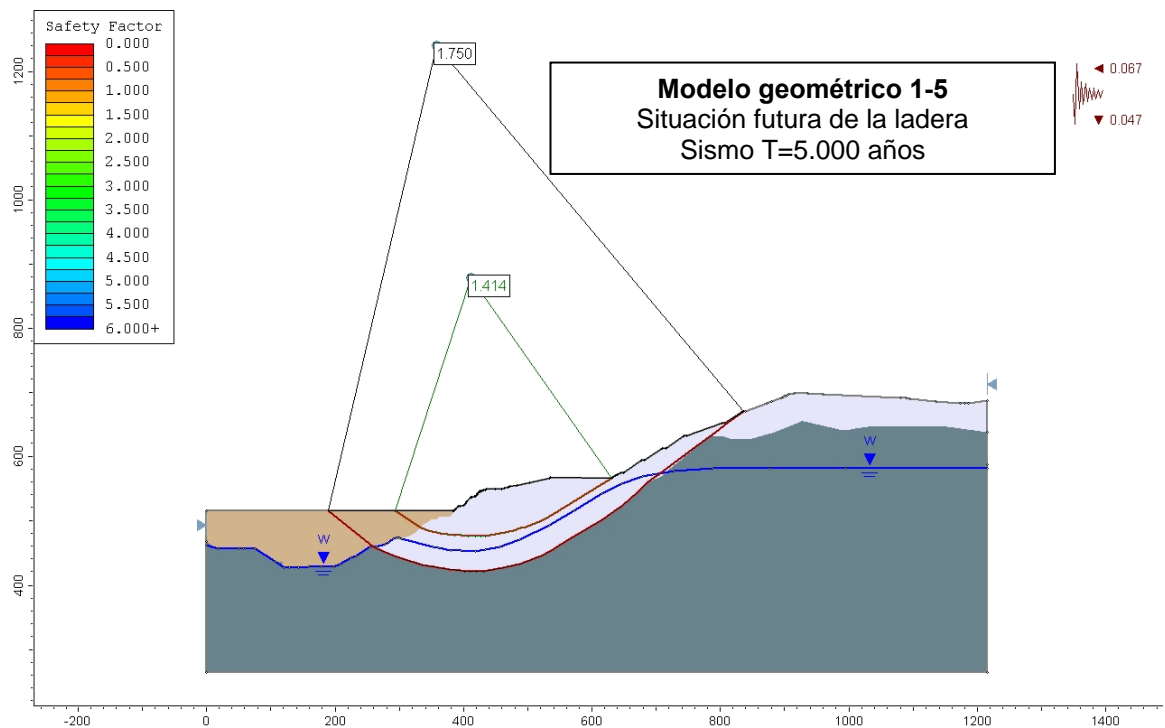


Figura 4.11: Situación tras la excavación realizada en la parte superior de la ladera y la construcción de la nueva presa, considerando las condiciones extremas (sismo de 5000 años). FS= 1.414 para la SPR y FS= 1.750 para la SIR.

Conclusiones obtenidas

En los análisis de estabilidad del **Modelo Geométrico 1** (Perfil nº1 según el eje de la nueva presa), partiendo de la condición de equilibrio límite de 2013, se deduce que el efecto estabilizador de la excavación realizada garantiza la estabilidad de la ladera a largo plazo, alcanzándose un factor de seguridad de **FS= 1.250** para la superficie de rotura principal SPR y **FS= 1.211** para la superficie inferior de rotura SIR.

Si se simula la acción sísmica de Proyecto (T=1.000 años), contando solamente con el efecto estabilizador de la excavación realizada, la ladera es estable durante el episodio sísmico, alcanzándose un FS= 1.105 para la SPR y FS= 1.088 para la SIR. Si se analiza el terremoto extremo (T=5.000 años) la ladera se acercaría a la condición de equilibrio límite durante el episodio sísmico, alcanzándose un FS= 1.001 para la SPR y FS= 1.007 para la SIR.

Si se tiene en cuenta el efecto estabilizador que la construcción de la nueva presa tendría sobre la ladera en este punto concreto de análisis la situación mejora radicalmente, alcanzándose un factor de seguridad de **FS= 1.800** para la superficie de rotura principal SPR y **FS= 2.246** para la superficie inferior de rotura SIR.

Si en este caso se analiza la acción sísmica de T= 1.000 años se alcanza un FS= 1.564 para la SPR y FS=1.940 para la SIR. Si se simula el terremoto extremo (T=5.000 años) la situación sería claramente estable alcanzándose un FS= 1.414 para la SPR y FS= 1.750 para la SIR.

Medidas adicionales para mejorar el factor de seguridad

Aunque la condición de estabilidad que se alcanza con la excavación de la ladera (sin tener en cuenta el efecto estabilizador de la presa) garantiza su estabilidad (FS= 1.250 para la SPR y FS= 1.211 para la SIR), si se pretende llegar a mayores cotas de seguridad sería necesario excavar en la zona de la Urbanización Lasaitasuna. Si se profundiza el fondo de la excavación en unos 10 m, el factor de seguridad resultante en la ladera ascendería a **FS= 1.394** para la SPR y **FS= 1.236** para la SIR (figura 4.12). En el caso de sismo accidental

resultaría un FS= 1.215 para la SPR y FS= 1.117 para la SIR, mientras que para el sismo extremo resultaría un FS= 1.095 para la SPR y FS= 1.029 para la SIR.

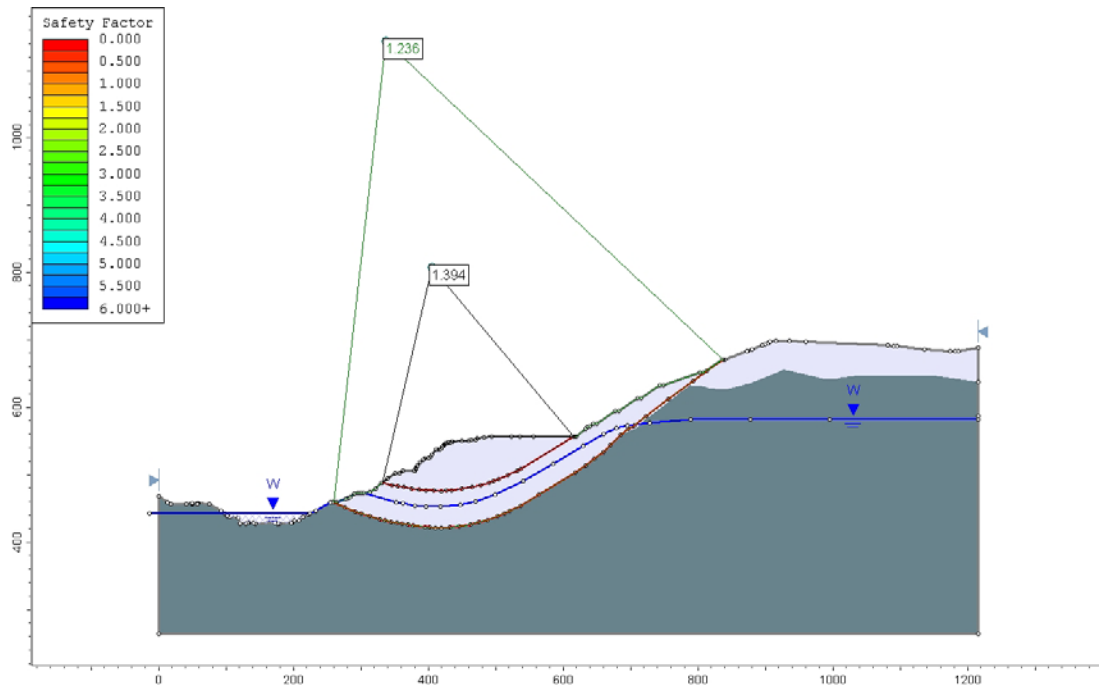


Figura 4.12: Situación tras la excavación realizada en la parte superior de la ladera y en el supuesto de que se lleva a cabo una excavación adicional de 10 m en el fondo de la excavación actual, en la Urbanización Lasaitasuna. Se obtiene un FS= 1.394 para la SPR y FS= 1.236 para la SIR.

4.5.2 MODELO GEOMÉTRICO 2: PERFIL N°2

Resultados de los análisis

Partiendo de la situación de equilibrio límite de la ladera en 2013, se han simulado las condiciones de estabilidad de la ladera tras la finalización de las actuaciones previstas, las cuales se encuentran en un avanzado estado de ejecución. La eficacia de dichas medidas se evidenciaba ya por la deceleración que estaba registrando el movimiento de la ladera con el progreso de los trabajos en sus fases iniciales. Este modelo geométrico es de los más representativos de las condiciones de la ladera.

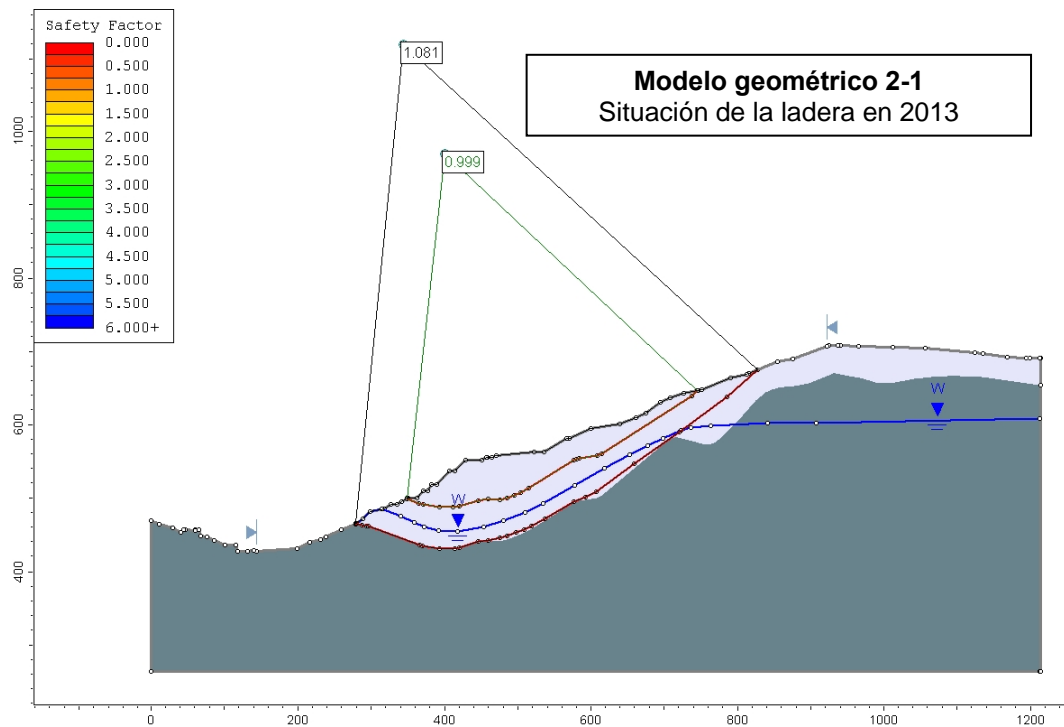


Figura 4.13: Situación de la ladera actual al inicio de 2013, antes del comienzo de las obras de estabilización en curso. $FS= 0.999$ (equilibrio límite) para la SPR y $FS= 1.081$ para la SIR. Situación en la que se detecta el movimiento en la ladera.

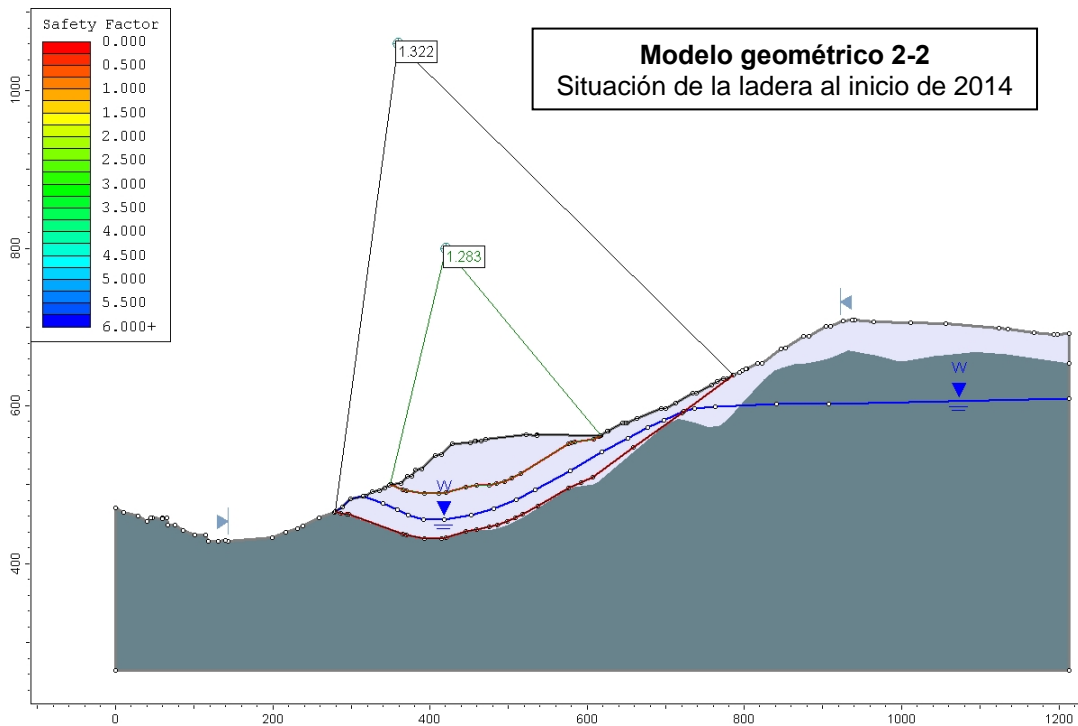


Figura 4.14: Situación tras la excavación realizada en la parte superior de la ladera. $FS= 1.283$ para la SPR y $FS= 1.322$ para la SIR. El factor de seguridad, sin tener en cuenta el efecto estabilizador adicional del espaldón de la nueva presa, adquiere unos niveles que garantizan la estabilidad.

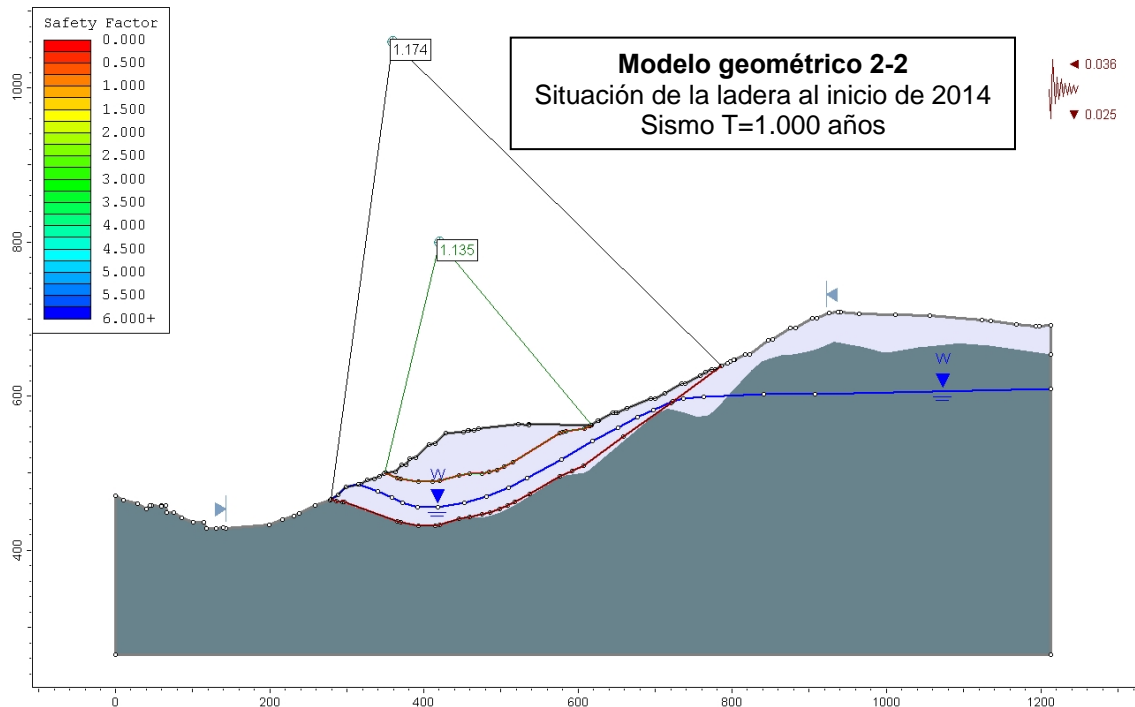


Figura 4.15: Situación tras la excavación realizada en la parte superior de la ladera considerando las condiciones accidentales (sismo de 1.000 años). FS= 1.135 para la SPR y FS= 1.174 para la SIR.

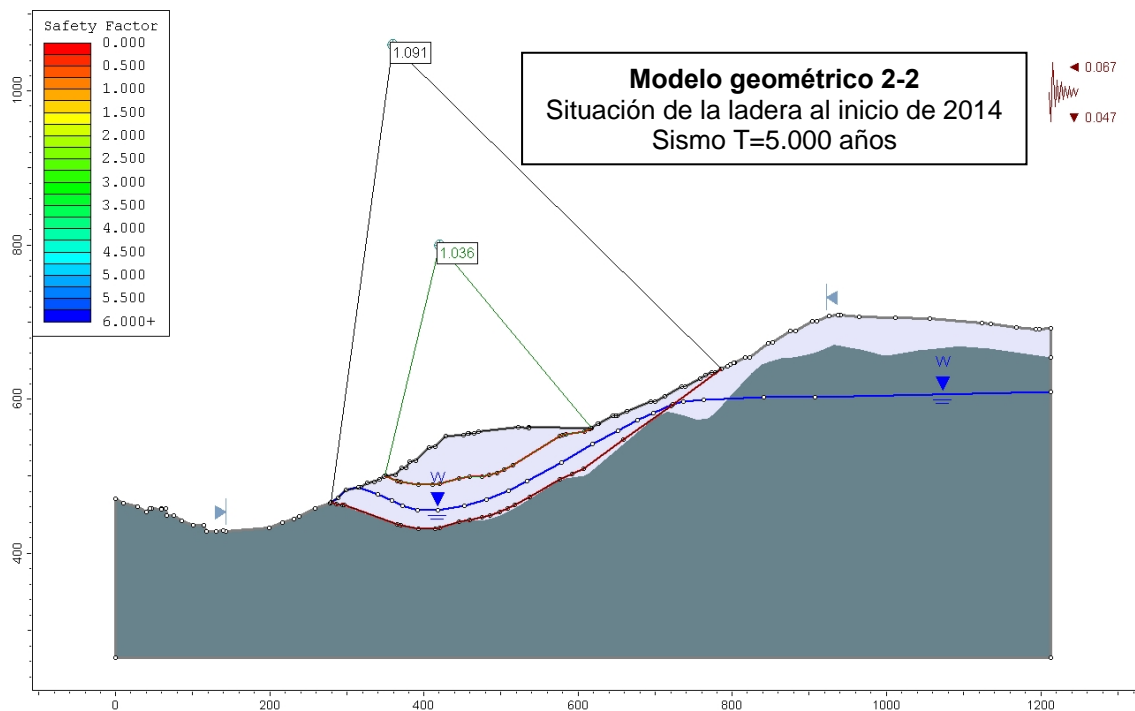


Figura 4.16: Situación tras la excavación realizada en la parte superior de la ladera considerando las condiciones extremas (sismo de 5.000 años). FS= 1.036 para la SPR y FS= 1.091 para la SIR.

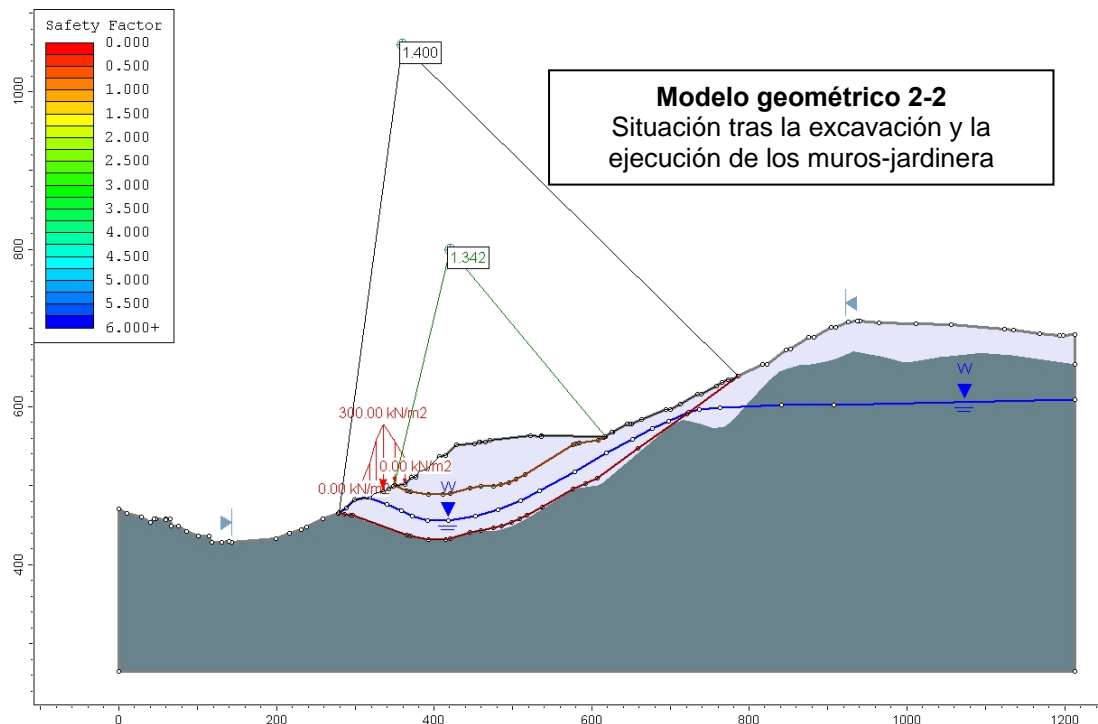


Figura 4.17: Situación tras la excavación realizada en la parte superior de la ladera y tras la ejecución de los muros-jardinera. FS= 1.342 para la SPR y FS= 1.400 para la SIR. El factor de seguridad, sin tener en cuenta el efecto estabilizador adicional del espaldón de la nueva presa, adquiere unos niveles que garantizan la estabilidad.

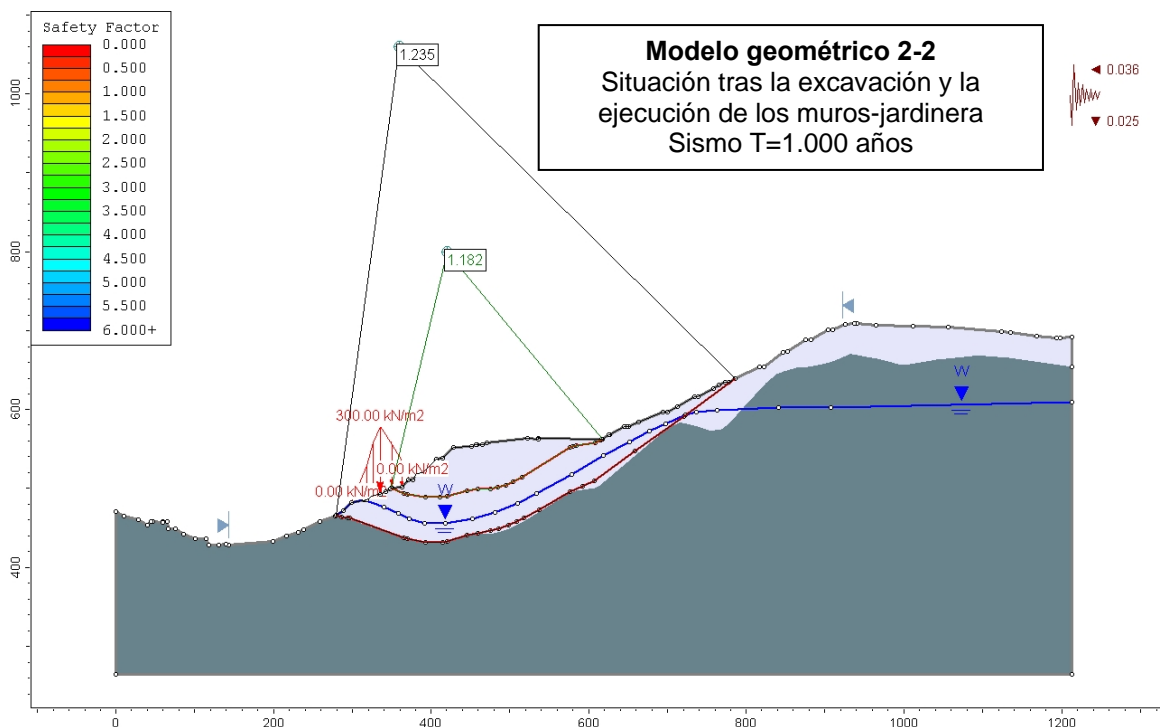


Figura 4.18: Situación tras la excavación realizada en la parte superior de la ladera y la ejecución de los muros-jardinera considerando las condiciones accidentales (sismo de 1.000 años). FS= 1.182 para la SPR y FS= 1.235 para la SIR.

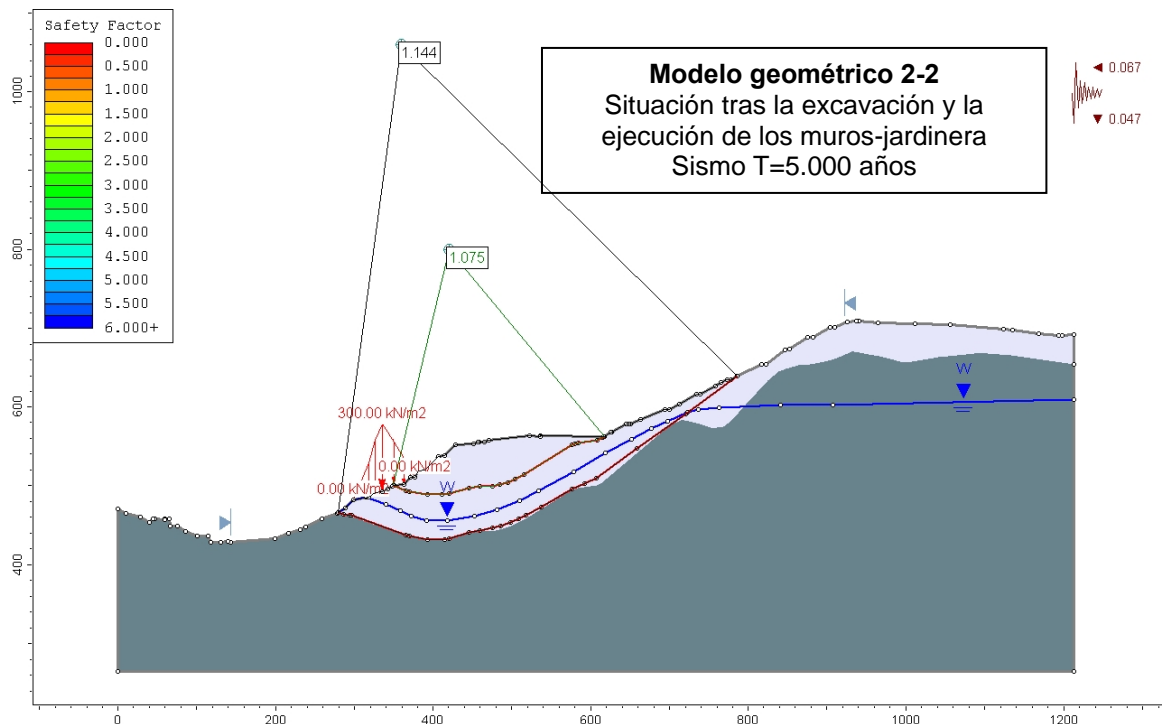


Figura 4.19: Situación tras la excavación realizada en la parte superior de la ladera y tras la ejecución de los muros-jardinera considerando las condiciones extremas (sismo de 5.000 años). FS= 1.075 para la SPR y FS= 1.144 para la SIR.

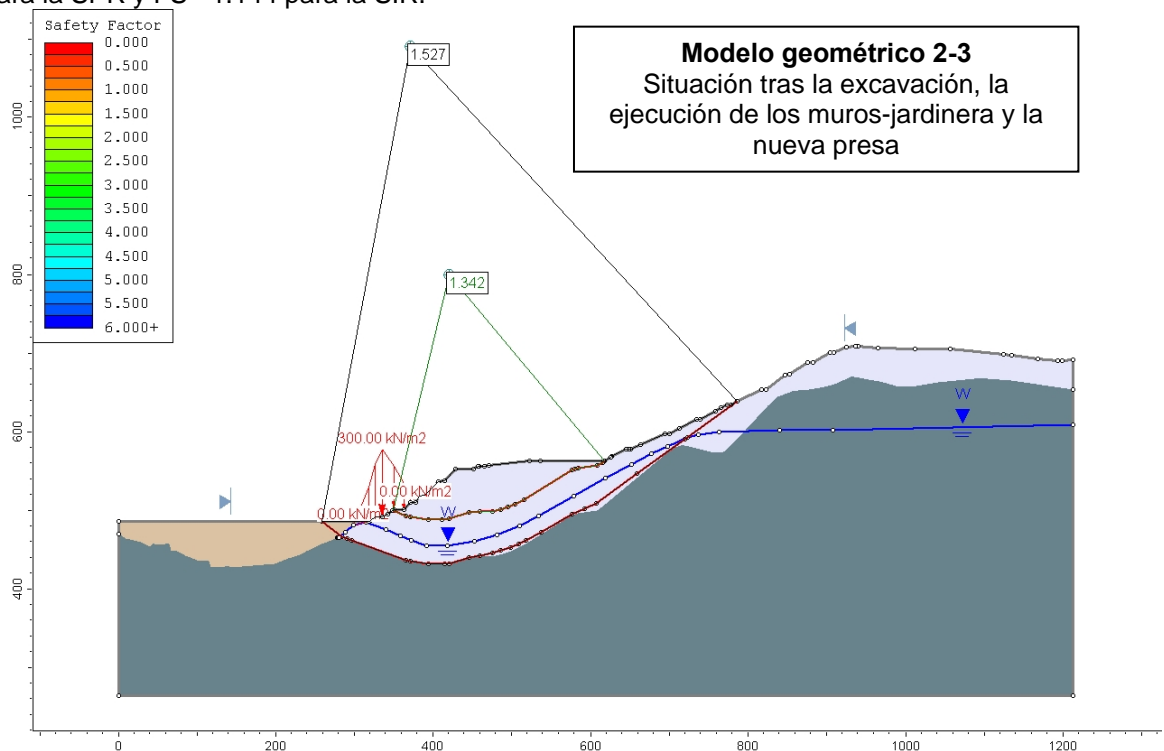


Figura 4.20: Situación tras la excavación realizada en la parte superior de la ladera, la ejecución de los muros-jardinera y la nueva presa. FS= 1.342 para la SPR y FS=1.527 para la SIR. El factor de seguridad, sin tener en cuenta el efecto estabilizador adicional del espaldón de la nueva presa, adquiere unos niveles que garantizan la estabilidad.

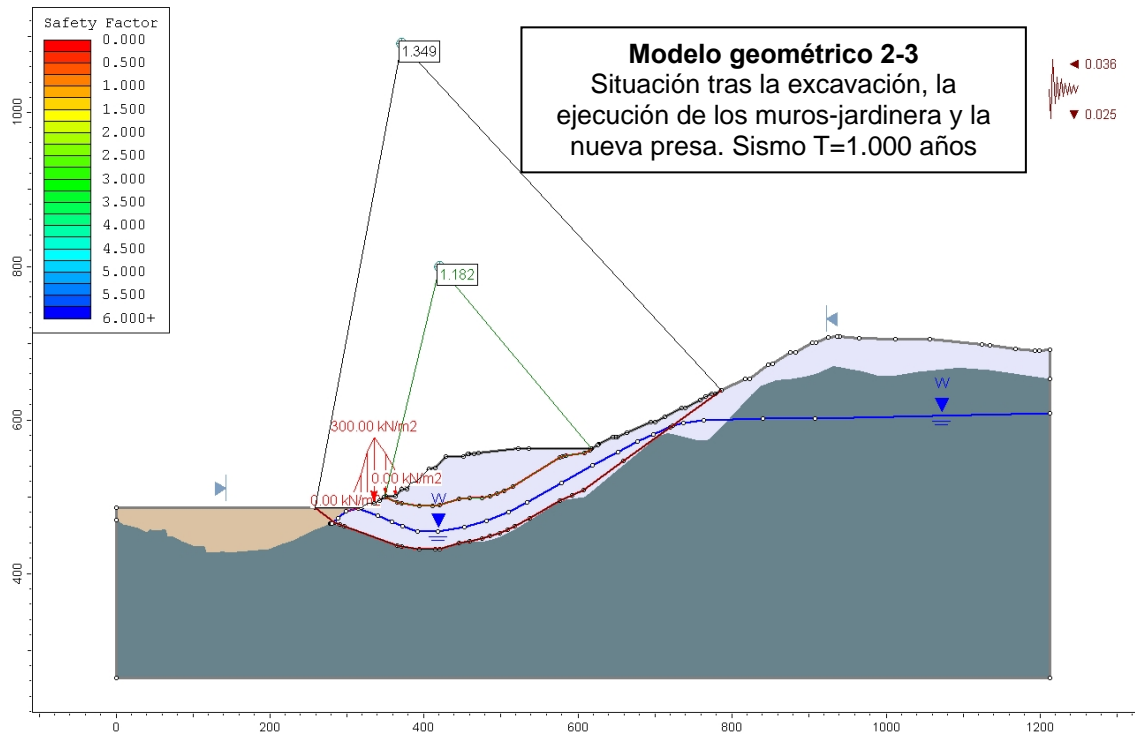


Figura 4.21: Situación tras la excavación realizada en la parte superior de la ladera, tras la ejecución de los muros-jardinería y la nueva presa, considerando las condiciones accidentales (sismo de 1.000 años). FS= 1.182 para la SPR y FS=1.349 para la SIR.

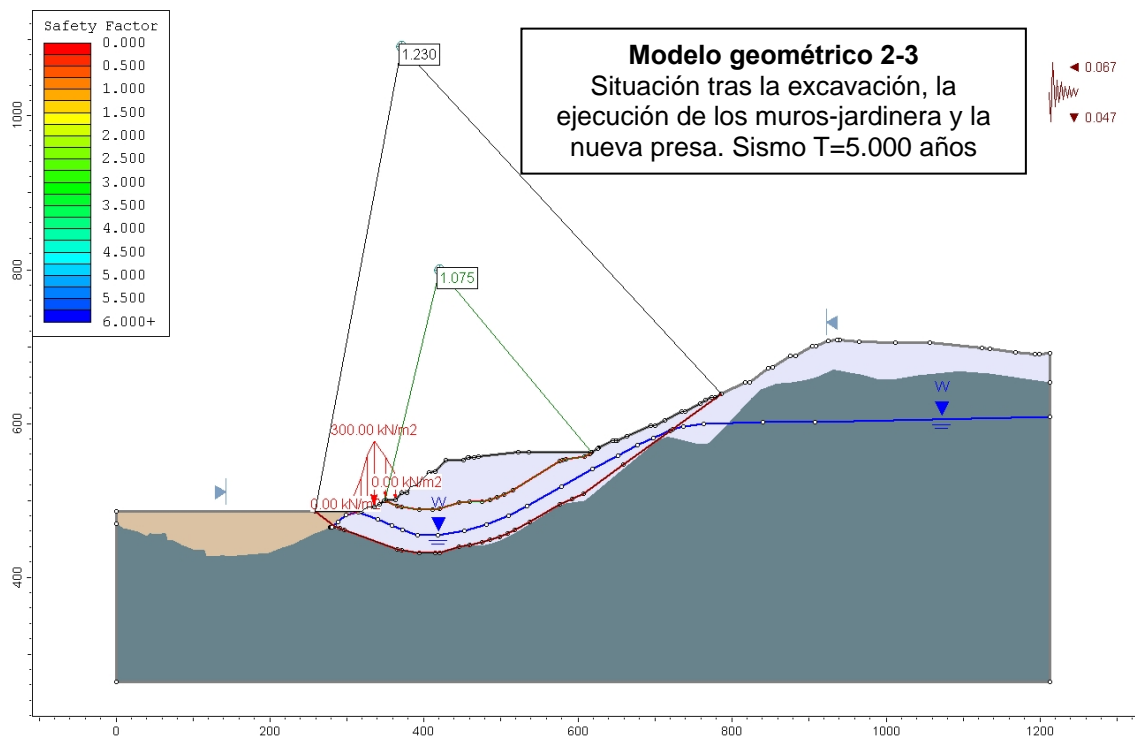


Figura 4.22: Situación tras la excavación realizada en la parte superior de la ladera, la ejecución de los muros-jardinería y la nueva presa, considerando las condiciones extremas (sismo de 5.000 años). FS= 1.075 para la SPR y FS= 1.230 para la SIR.

Conclusiones obtenidas

En los análisis de estabilidad del **Modelo Geométrico 2** (Perfil nº 2 situado entre las dos presas), partiendo de la condición de equilibrio límite de 2013, se deduce que el efecto estabilizador de la **excavación realizada** garantiza la estabilidad de la ladera a largo plazo, alcanzándose un factor de seguridad de **FS= 1.283** para la superficie de rotura principal SPR y **FS= 1.322** para la superficie inferior de rotura SIR.

Si se simula la acción sísmica de Proyecto (T=1.000 años), contando solamente con el efecto estabilizador de la excavación realizada, la ladera es estable durante el episodio sísmico, alcanzándose un FS= 1.135 para la SPR y FS= 1.174 para la SIR. Si se analiza el terremoto extremo (T=5.000 años) la ladera no llegaría a la condición de equilibrio límite durante el episodio sísmico, alcanzándose un FS= 1.036 para la SPR y FS=1.091 para la SIR.

Si se analiza la estabilidad proporcionada por la **excavación realizada y los muros-jardinera** que están en ejecución, se alcanza un factor de seguridad de **FS= 1.342** para la SPR y **FS= 1.400** para la SIR. Si se tiene en cuenta la acción sísmica de T=1.000 años se alcanza un FS= 1.182 para la SPR y FS=1.235 para la SIR. Si se simula el terremoto extremo (T=5.000 años) la situación sería estable alcanzándose un FS= 1.075 para la SPR y FS=1.144 para la SIR.

Si se tiene en cuenta el efecto estabilizador que la construcción de la **nueva presa** tendría sobre la ladera en este punto concreto de análisis, donde el espaldón de aguas arriba de la presa se situaría a la cota 478, la situación mejora de forma apreciable para la superficie inferior de rotura SIR, no viéndose afectada la SPR. El factor de seguridad alcanzado es de **FS= 1.342** para SPR y **FS= 1.527** para la SIR.

Si en este caso se analiza la acción sísmica de T=1.000 años se alcanza un FS= 1.182 para la SPR y FS=1.349 para la SIR. Si se simula el terremoto extremo (T=5.000 años) la situación sería estable alcanzándose un FS= 1.175 para la SPR y FS= 1.230 para la SIR.

Medidas adicionales para mejorar el factor de seguridad

Aunque la condición de estabilidad que se alcanza con la excavación de la ladera y la ejecución de los muros-jardinera (sin tener en cuenta el efecto estabilizador de la presa) garantiza su estabilidad (FS= 1.342 para la SPR y FS= 1.400 para la SIR), si se pretende llegar a mayores cotas de seguridad sería necesario excavar en la zona de las urbanizaciones Lasaitasuna y Mirador de Yesa. Si se profundiza el fondo de la excavación en unos 10 m, el factor de seguridad resultante en la ladera ascendería a **FS= 1.518** para la SPR y **FS= 1.458** para la SIR (figura 4.23). En el caso de sismo accidental resultaría un FS= 1.319 para la SPR y FS= 1.285 para la SIR, mientras que para el sismo extremo resultaría un FS= 1.182 para la SPR y FS= 1.174 para la SIR.

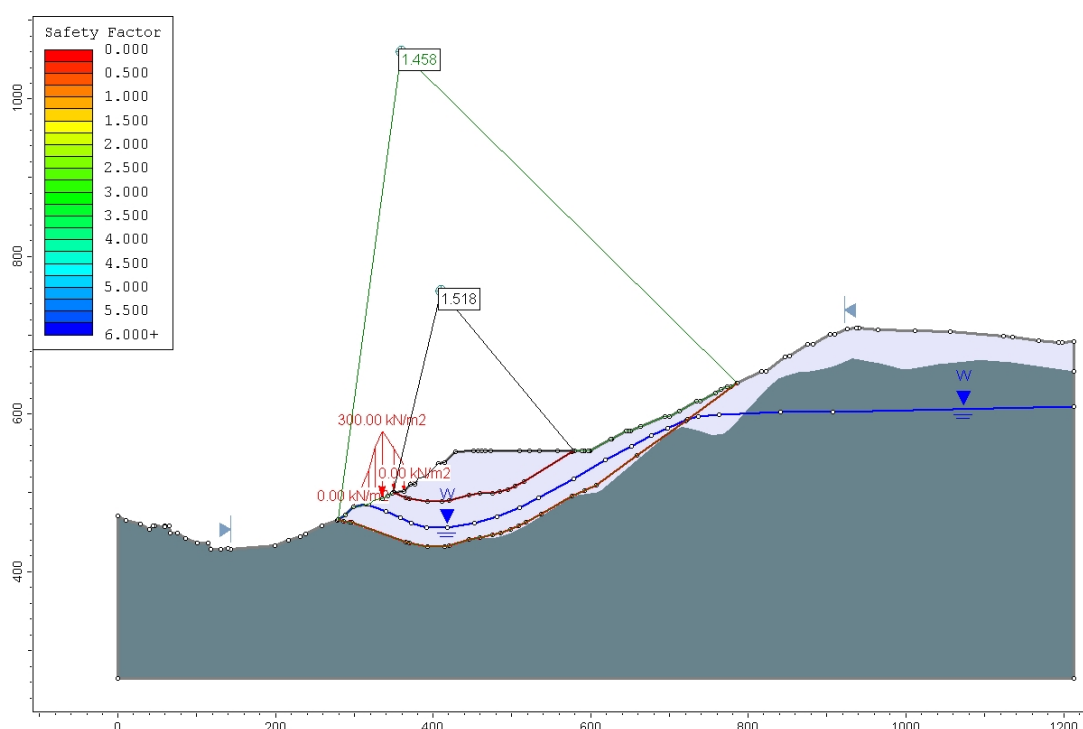


Figura 4.23: Situación tras la excavación realizada en la parte superior de la ladera, la ejecución de los muros-jardinera al pie y en el supuesto de que se lleva a cabo una excavación adicional de 10 m en el fondo de la excavación actual, en las urbanizaciones Lasaitasuna y Mirador de Yesa. Se obtiene un FS= 1.518 para la SPR y FS= 1.458 para la SIR.

4.5.3 MODELO GEOMÉTRICO 3: PERFIL N°3

Resultados de los análisis

Partiendo de la situación de equilibrio límite de la ladera en 2013, se han simulado las condiciones de estabilidad de la ladera tras la finalización de las actuaciones previstas, las cuales se encuentran en un avanzado estado de ejecución. La eficacia de dichas medidas se evidenciaba ya por la deceleración que estaba registrando el movimiento de la ladera con el progreso de los trabajos en sus fases iniciales. Este modelo geométrico es un caso singular en los análisis al situarse el perfil alineado con el eje de la presa actual.

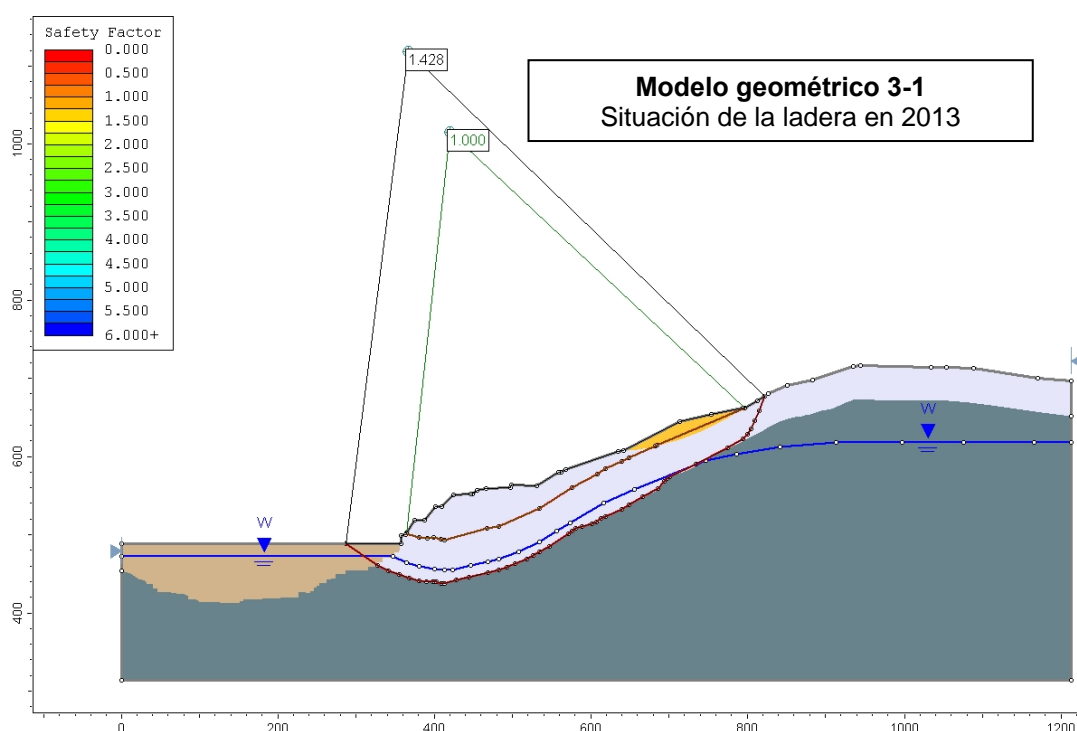


Figura 4.24: Situación de la ladera actual al inicio de 2013, antes del comienzo de las obras de estabilización en curso. FS= 1.000 (equilibrio límite) para la SPR y FS=1.428 para la SIR. Situación en la que se detecta el movimiento en la ladera.

Puede observarse como para la SIR se obtiene un factor de seguridad elevado como consecuencia de la presencia de la presa actual. Si no estuviera presente la presa, con la geometría de la ladera que fue excavada en su día para su ejecución, la ladera sería claramente inestable, tal y como se observa en la figura 4.25.

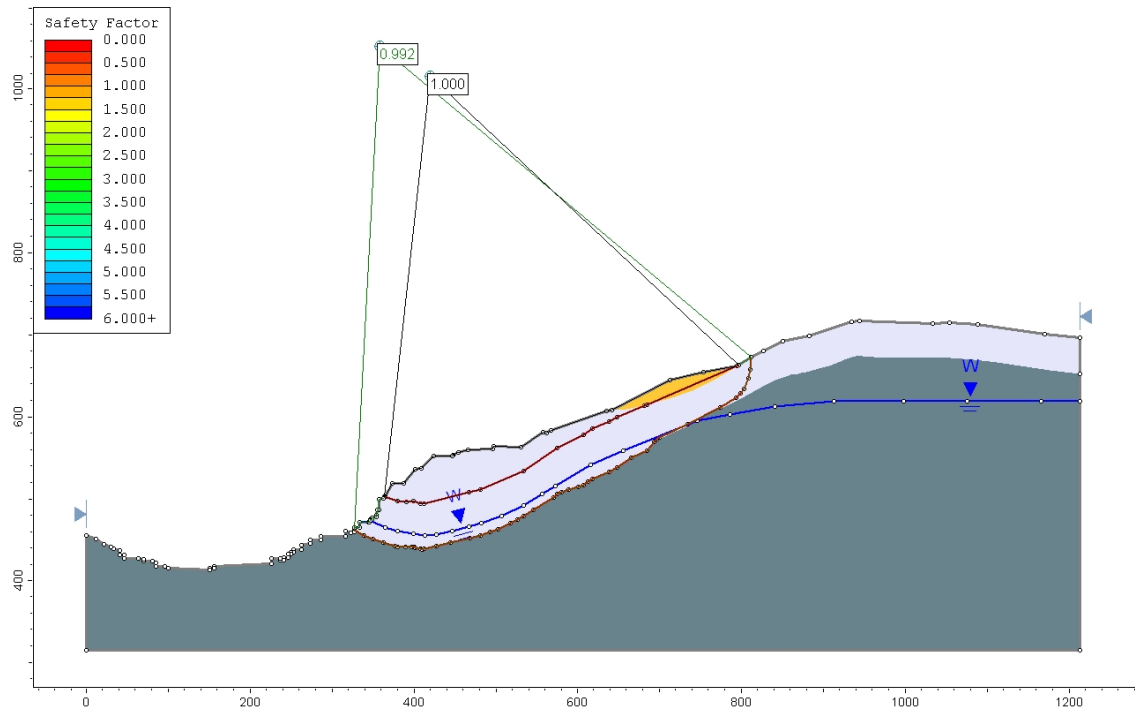


Figura 4.25: Situación hipotética en la que la presa actual no existiera. La ladera presenta una geometría muy escarpada como consecuencia de la excavación realizada para la construcción de la presa y sería claramente inestable: FS= 1.000 (equilibrio límite) para la SPR y FS= 0.992 para la SIR.

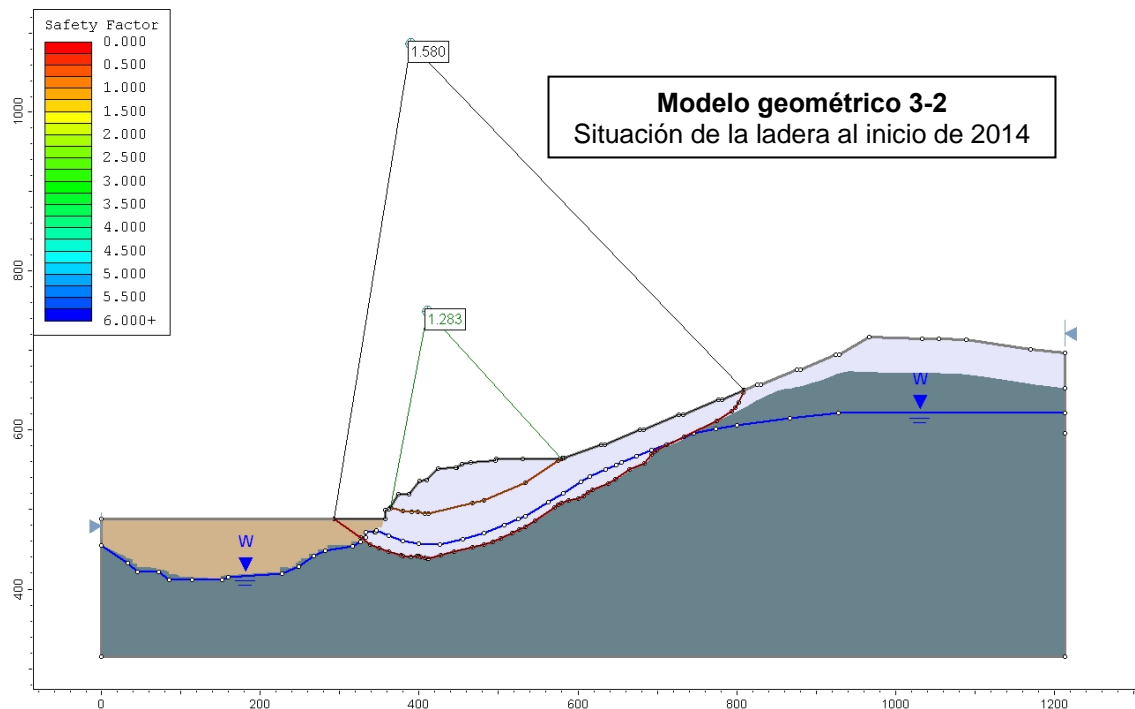


Figura 4.26: Situación tras la excavación realizada en la parte superior de la ladera. FS= 1.283 para la SPR y FS=1.580 para la SIR. El factor de seguridad, sin tener en cuenta el efecto estabilizador adicional del espaldón de la nueva presa, adquiere unos niveles que garantizan la estabilidad. El resultado obtenido para la SPR es idéntico al caso del modelo geométrico 2.

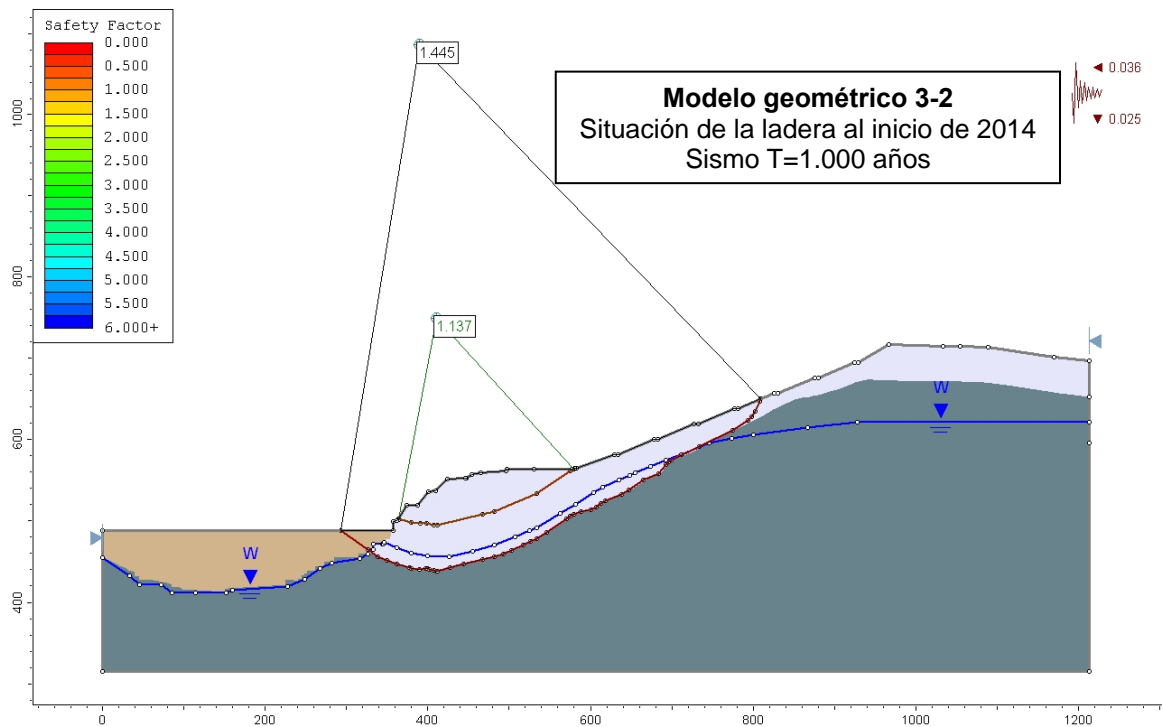


Figura 4.27: Situación tras la excavación realizada en la parte superior de la ladera considerando las condiciones accidentales (sismo de 1.000 años). FS= 1.137 para la SPR y FS= 1.445 para la SIR.

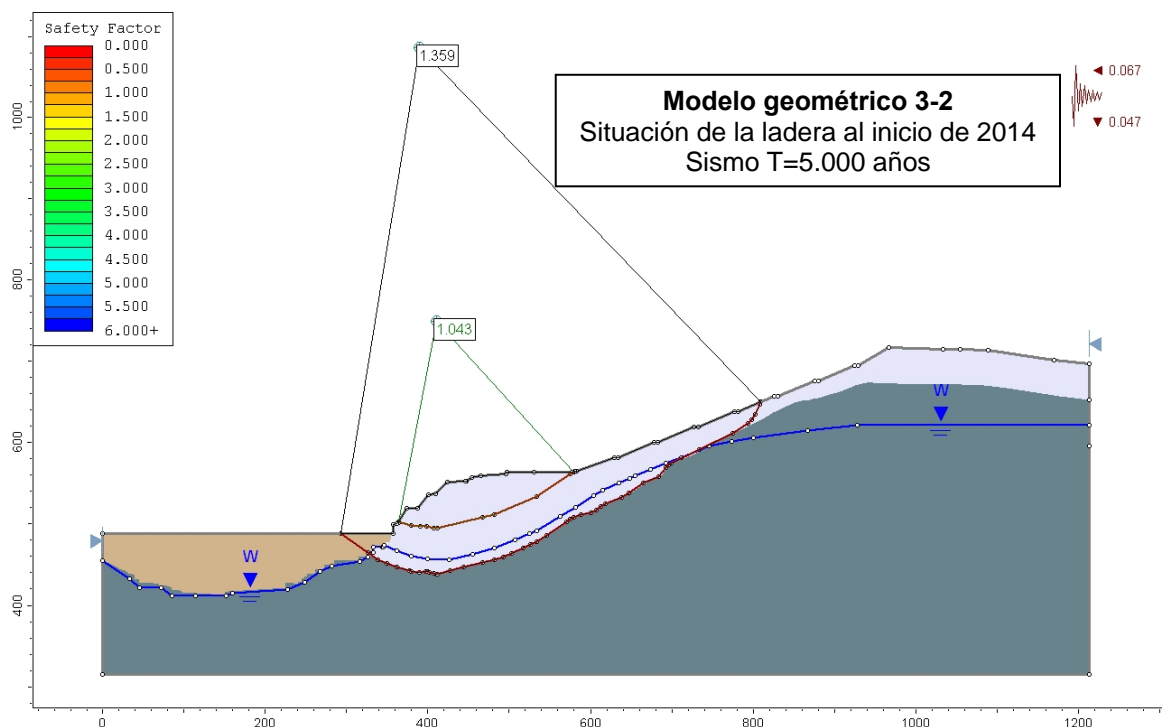


Figura 4.28: Situación tras la excavación realizada en la parte superior de la ladera considerando las condiciones extremas (sismo de 5.000 años). FS= 1.043 para la SPR y FS= 1.359 para la SIR.

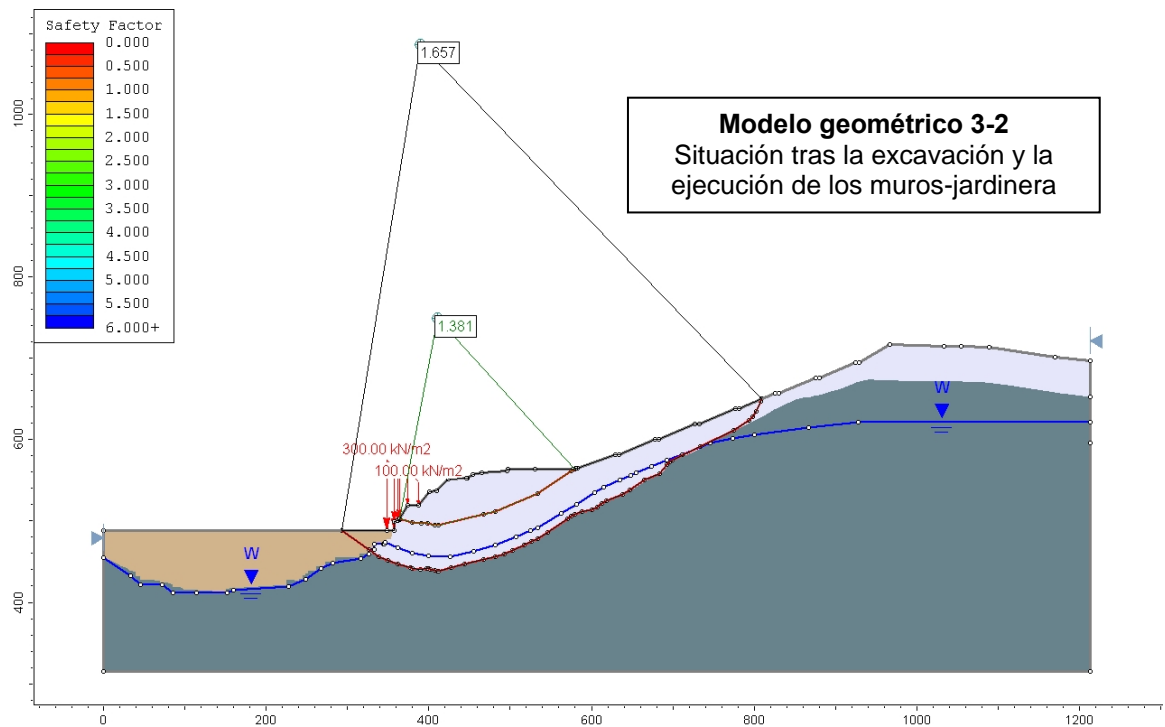


Figura 4.29: Situación tras la excavación realizada en la ladera y la ejecución de los muros-jardinera. FS= 1.381 para la SPR y FS= 1.657 para la SIR. El factor de seguridad adquiere unos niveles que garantizan la estabilidad.

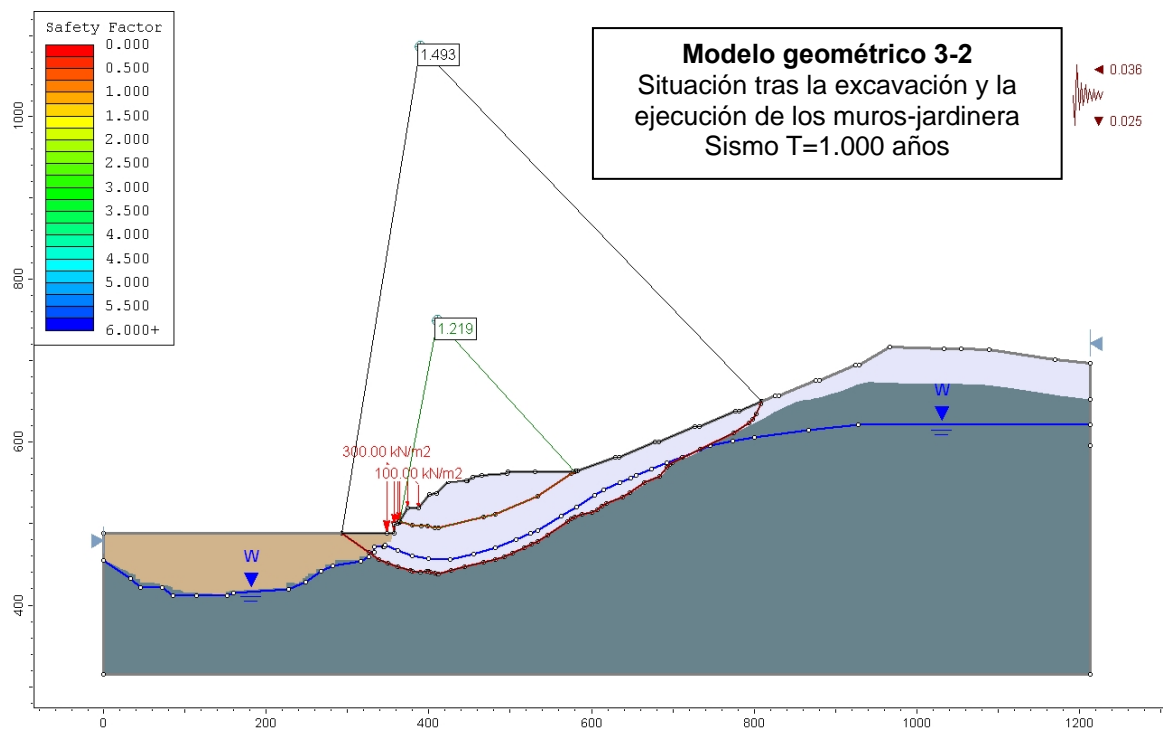


Figura 4.30: Situación tras la excavación realizada en la ladera y la ejecución de los muros-jardinera considerando las condiciones accidentales (sismo de 1.000 años). FS= 1.219 para la SPR y FS=1.493 para la SIR.

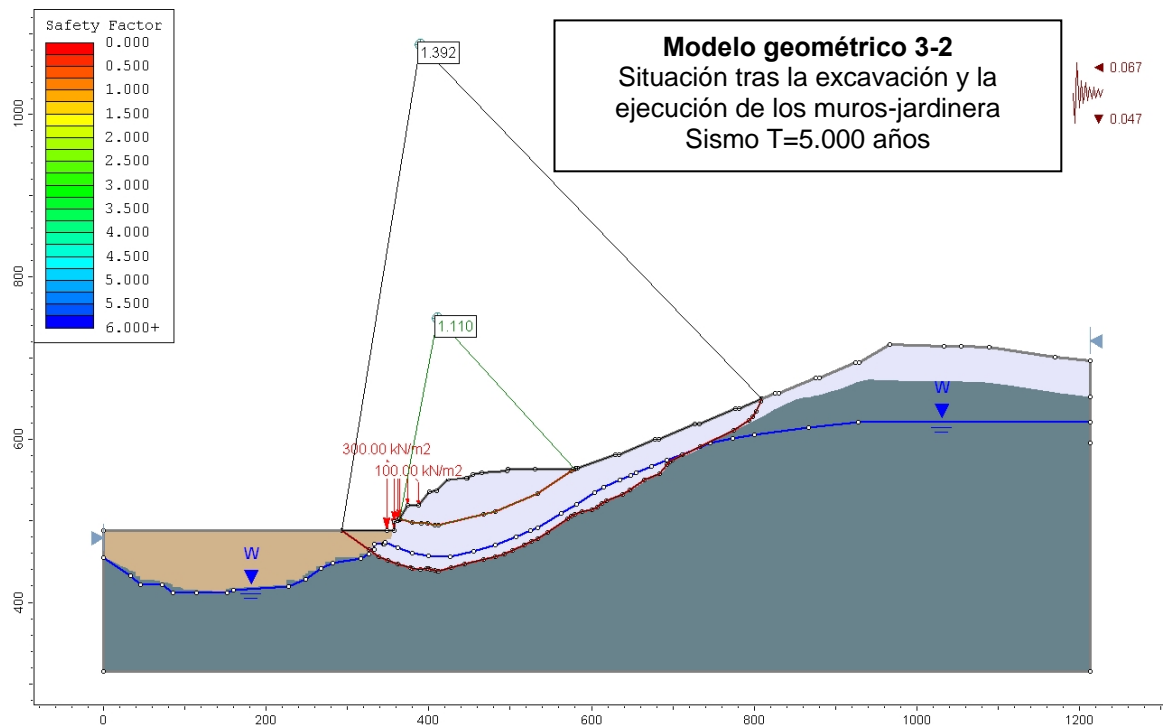


Figura 4.31: Situación tras la excavación realizada en la ladera y la ejecución de los muros-jardinera considerando las condiciones extremas (sismo de 5.000 años). FS= 1.110 para la SPR y FS=1.392 para la SIR.

Conclusiones obtenidas

En los análisis de estabilidad del **Modelo Geométrico 3** (Perfil nº 3 que discurre alineado con la coronación de la presa actual), partiendo de la condición de equilibrio límite de 2013, se deduce que el efecto estabilizador de la **excavación realizada** garantiza la estabilidad de la ladera a largo plazo, alcanzándose un factor de seguridad de **FS= 1.283** para la superficie de rotura principal SPR y **FS= 1.580** para la superficie inferior de rotura SIR (en este caso la SIR presenta un elevado factor de seguridad por la presencia de la presa actual, sin ella esta superficie de rotura sería inestable).

Si se simula la acción sísmica de Proyecto (T=1.000 años), contando solamente con el efecto estabilizador de la excavación realizada, la ladera es estable durante el episodio sísmico, alcanzándose un FS= 1.137 para la SPR y FS= 1.445 para la SIR. Si se analiza el terremoto extremo (T=5.000 años) la ladera no llegaría a la condición de equilibrio límite durante el episodio sísmico, alcanzándose un FS= 1.043 para la SPR y FS=1.359 para la SIR.

Si se analiza la estabilidad proporcionada por la **excavación realizada y los muros-jardinera** que están en ejecución, se alcanza un factor de seguridad de **FS= 1.381** para la SPR y **FS= 1.657** para la SIR. Si se tiene en cuenta la acción sísmica de T= 1.000 años se alcanza un FS= 1.219 para la SPR y FS= 1.493 para la SIR. Si se simula el terremoto extremo (T=5.000 años) la situación sería estable alcanzándose un FS= 1.110 para la SPR y FS= 1.392 para la SIR.

Se han realizado cálculos donde se han simulado oscilaciones del nivel freático y del grado de saturación de la ladera, desembalses rápidos, etc. La situación más desfavorable simulada consiste en un **desembalse rápido** desde la cota 511 a la cota 478. En estos casos se obtiene un factor de seguridad de **FS= 1.308** para la SPR y **FS= 1.597** para la SIR. Si se tiene en cuenta la acción sísmica de T= 1.000 años se alcanza un FS= 1.158 para la SPR y FS= 1.455 para la SIR. Si se simula el terremoto extremo (T=5.000 años) la situación sería estable alcanzándose un FS= 1.058 para la SPR y FS= 1.369 para la SIR.

La situación de desembalse rápido, a pesar de haberse estudiado, es irreal, dado que la ladera quedará impermeabilizada en su totalidad por debajo de la cota de máximo embalse y no se verá influenciada por las oscilaciones del nivel de embalse. En estos cálculos no se ha tenido en cuenta el efecto estabilizador de los muros-jardinera en ejecución, por lo que son extremadamente conservadores.

Medidas adicionales para mejorar el factor de seguridad

Aunque la condición de estabilidad que se alcanza con la excavación de la ladera y la ejecución de los muros-jardinera garantiza su estabilidad (FS= 1.381 para la SPR y FS=1.667 para la SIR), si se pretende llegar a mayores cotas de seguridad sería necesario excavar en la zona de la Urbanización Mirador de Yesa. Si se rebaja el fondo de la excavación en unos 10 m, el factor de seguridad resultante en la ladera ascendería a **FS= 1.573** para la SPR y **FS= 1.703** para la SIR (figura 4.32). En el caso de sismo accidental resultaría un FS= 1.365 para la SPR y FS= 1.531 para la SIR, mientras que para el sismo extremo resultaría un FS= 1.231 para la SPR y FS= 1.420 para la SIR.

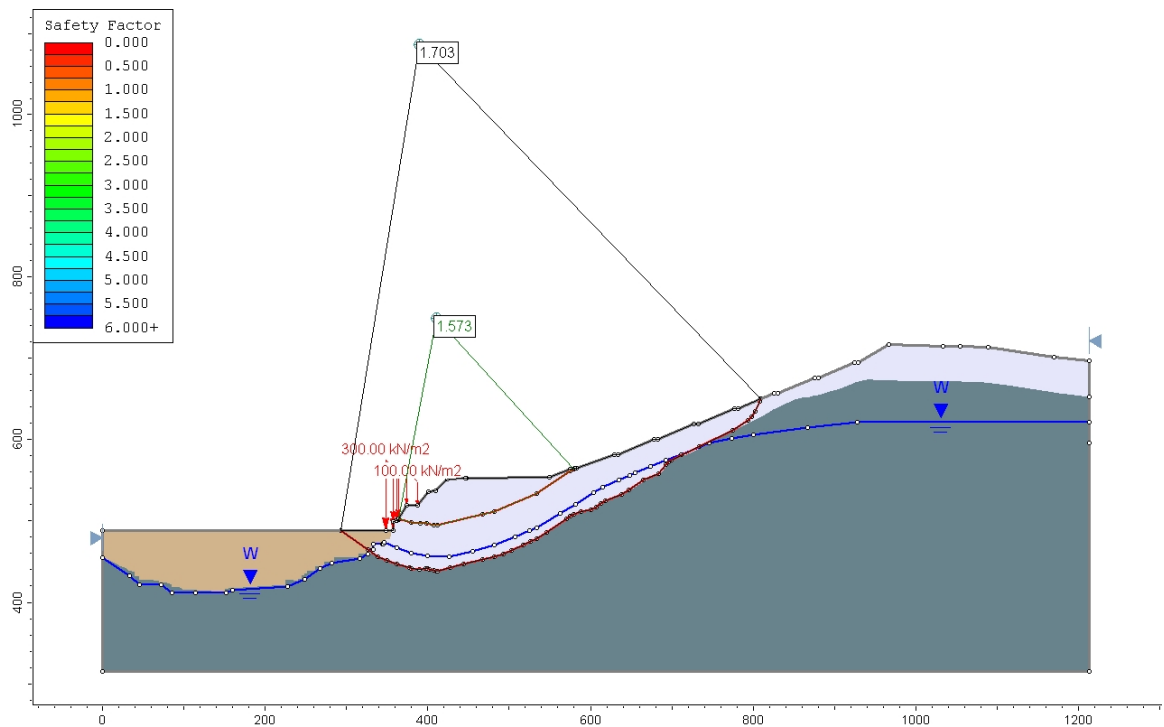


Figura 4.32: Situación tras la excavación realizada en la parte superior de la ladera, la ejecución de los muros-jardinera al pie y en el supuesto de que se lleva a cabo una excavación adicional de 10 m en el fondo de la excavación actual, en la Urbanización Mirador de Yesa. Se obtiene un FS= 1.573 para la SPR y FS= 1.703 para la SIR.

4.5.4 MODELO GEOMÉTRICO 5: PERFIL N°5

Resultados de los análisis

Partiendo de la situación de equilibrio límite de la ladera en 2013, se han simulado las condiciones de estabilidad de la ladera tras la finalización de las actuaciones de excavación previstas, las cuales se encuentran en un avanzado estado de ejecución. La eficacia de dichas medidas no es tan evidente en este caso, dado que la excavación afecta en menor medida a la SPR por la limitación que impone la Urbanización Mirador de Yesa en este sector.

El modelo geométrico considerado se ve afectado por las superficies de rotura SPR, SIR y el Deslizamiento del Inglés.

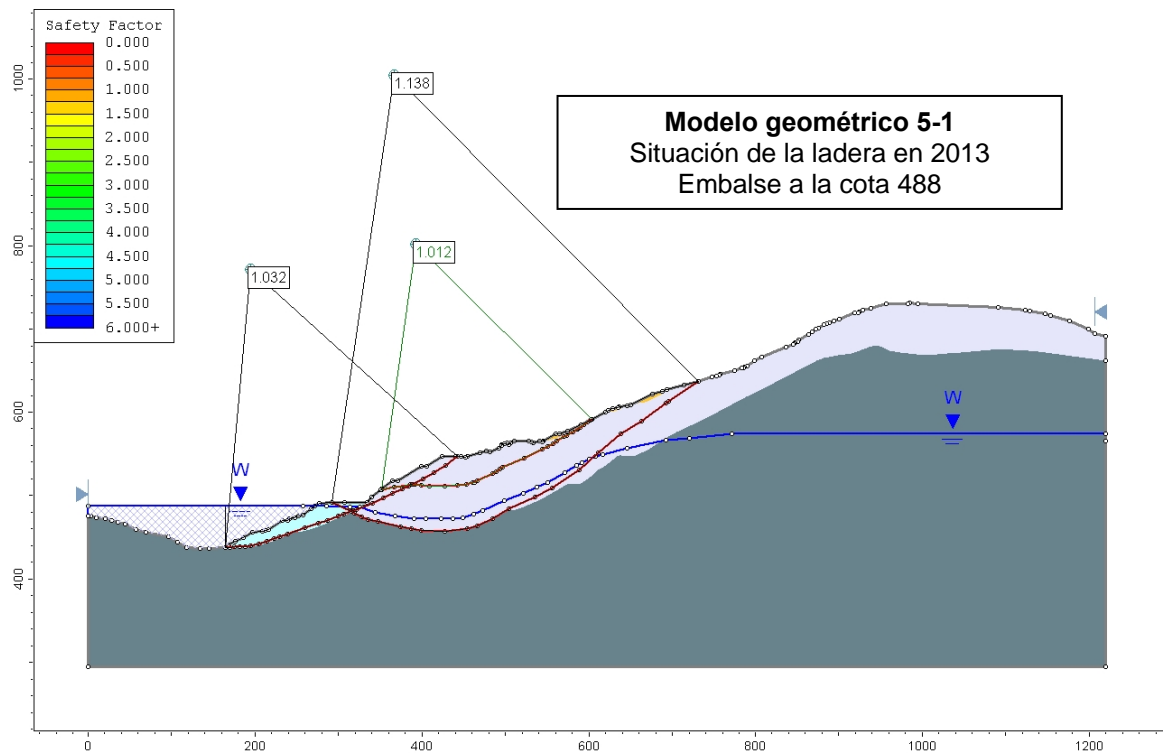


Figura 4.33: Situación de la ladera actual al inicio de 2013, antes del comienzo de las obras de estabilización en curso. FS= 1.012 (equilibrio límite) para la SPR, FS= 1.138 para la SIR y FS= 1.032 para el Deslizamiento del Inglés. Situación en la que se detecta el movimiento en la ladera en el caso de la SPR. El deslizamiento del Inglés sufre pequeños movimientos en cada desembalse desde hace décadas.

El análisis que se observa en la figura anterior corresponde a la situación de máximo llenado del embalse actual (488 m.s.n.m). Cuando se producen desembalses tiene lugar la movilización del deslizamiento del Inglés, tal y como se muestra a continuación en la figura 4.34.

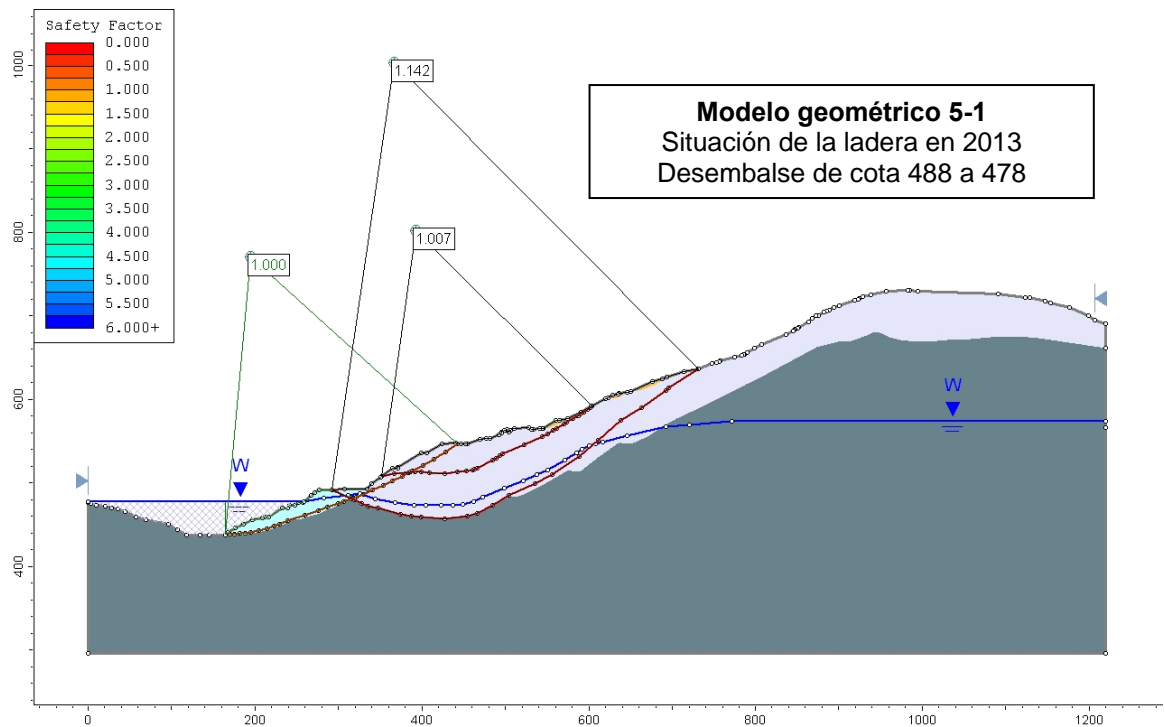


Figura 4.34: Situación de la ladera actual al inicio de 2013, antes del comienzo de las obras de estabilización en curso. Situación de desembalse desde la cota 488 a 478. FS= 1.007(equilibrio límite) para la SPR, FS=1.142 para la SIR y FS= 1.000 (equilibrio límite) para la el Deslizamiento del Inglés.

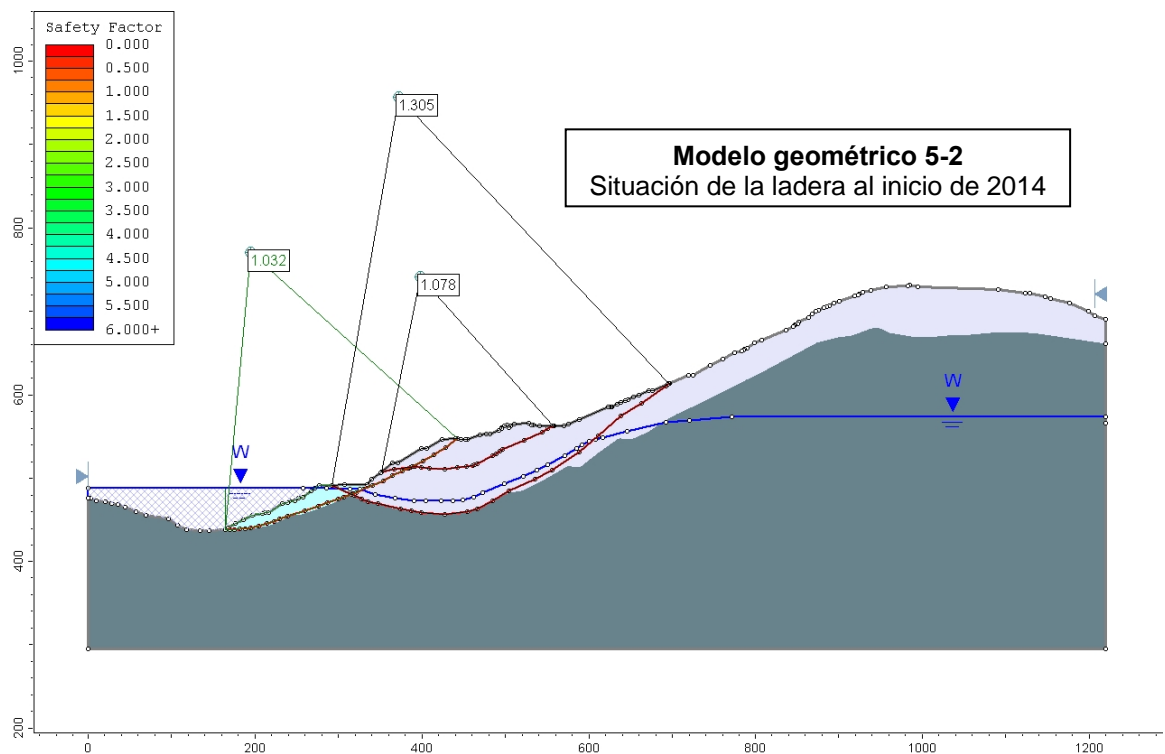


Figura 4.35: Situación de la ladera tras la excavación realizada. Se obtiene un FS= 1.078 para la SPR, FS= 1.305 para la SIR y FS= 1.032 para la el Deslizamiento del Inglés (a este no le afecta la excavación realizada).

Como se observa en la figura 4.35, la excavación prevista, ya prácticamente finalizada, mejora en gran medida la estabilidad de la superficie inferior de rotura SIR, resultando una configuración estable incluso en la situación de terremoto de diseño de $T= 1.000$ años ($FS=1.149$) y terremoto extremo de $T= 5.000$ años ($FS= 1.060$). En ambos casos, tanto la SPR como el deslizamiento del Inglés serían inestables.

Para mejorar la estabilidad de la ladera en este sector y alcanzar unas condiciones de estabilidad suficientes ante cualquier acción sísmica, es necesario optimizar la excavación, rebajando el fondo de la misma en unos 12 m. Pero para ello es necesaria la expropiación previa de la Urbanización Mirador de Yesa.

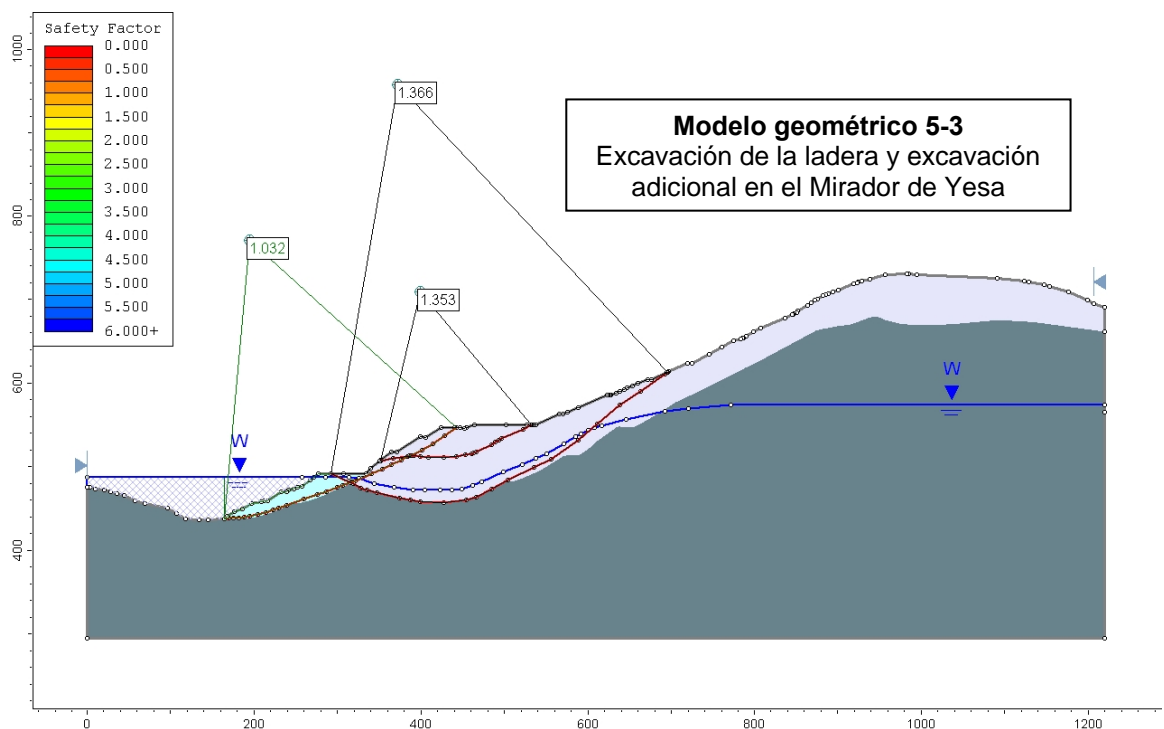


Figura 4.36: Situación de la ladera tras la excavación realizada y con una eventual excavación adicional de 12 m en la urbanización Mirador de Yesa. Se obtiene un $FS= 1.353$ para la SPR, $FS=1.366$ para la SIR y $FS= 1.032$ para el Deslizamiento del Inglés (a este no le afecta la excavación realizada en la ladera ni la que se analiza del Mirador de Yesa).

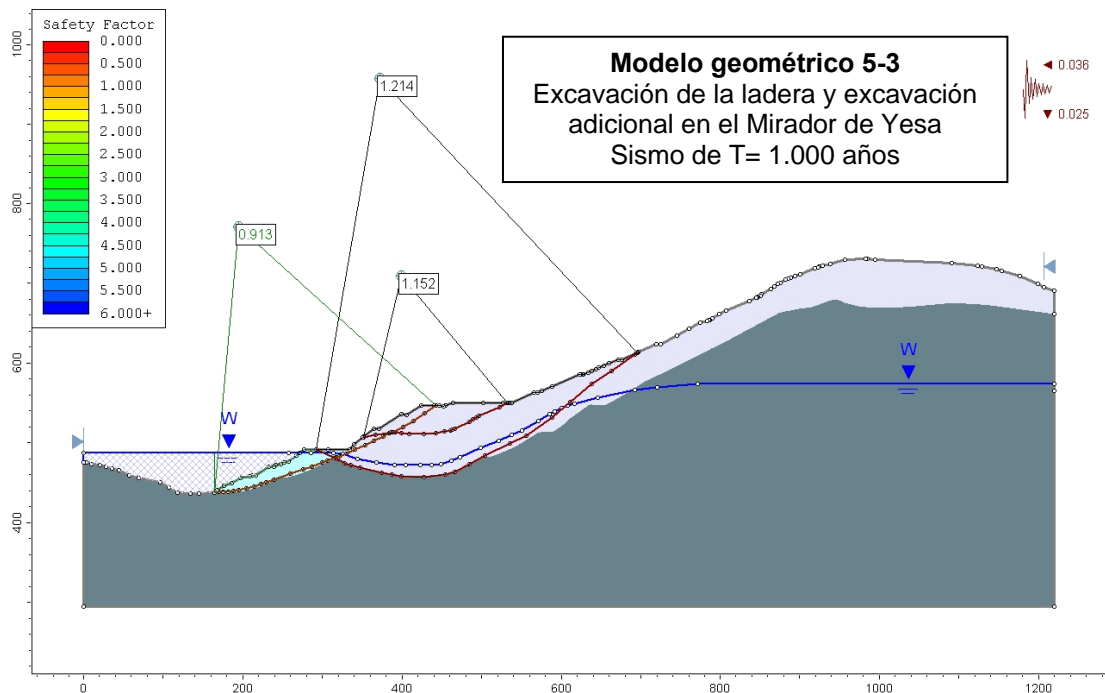


Figura 4.37: Situación de la ladera tras la excavación realizada y con una eventual excavación adicional de 12 m en la urbanización Mirador de Yesa, considerando las condiciones accidentales (sismo de 1.000 años). Se obtiene un FS= 1.152 para la SPR, FS= 1.214 para la SIR y FS<1 para el Deslizamiento del Inglés (a este no le afecta la excavación realizada en la ladera ni la que se analiza del Mirador de Yesa).

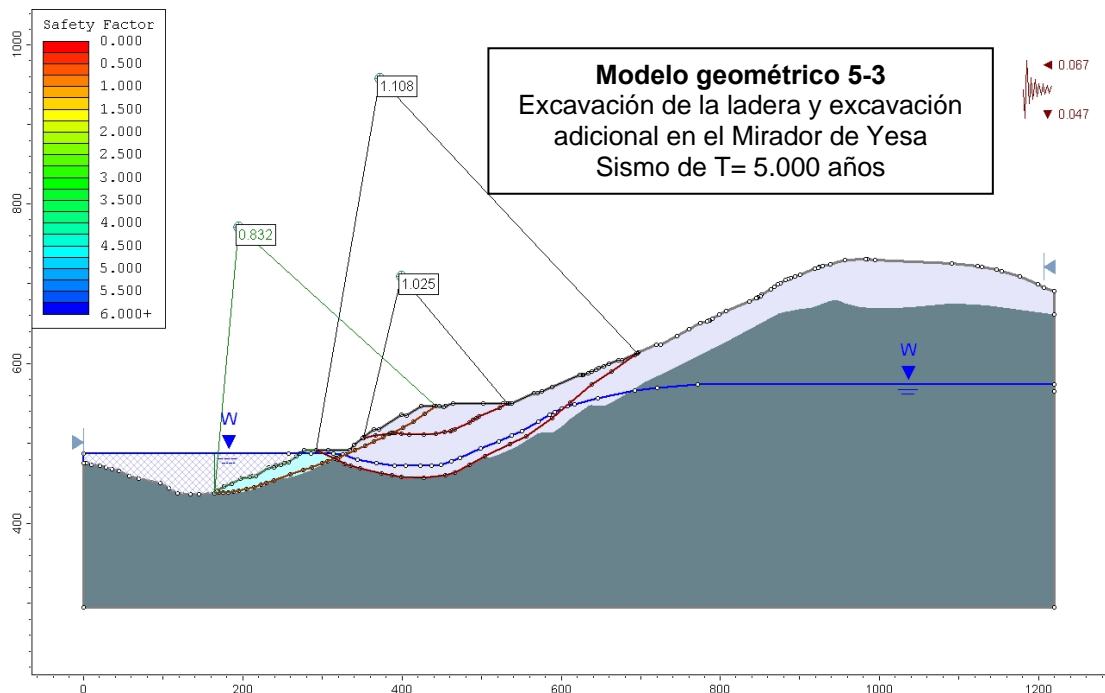


Figura 4.38: Situación de la ladera tras la excavación realizada y con una eventual excavación adicional de 12 m en la urbanización Mirador de Yesa, considerando las condiciones extremas (sismo de 5.000 años). Se obtiene un FS= 1.025 para la SPR, FS= 1.108 para la SIR y FS<1 para el Deslizamiento del Inglés (a este no le afecta la excavación realizada en la ladera ni la que se analiza del Mirador de Yesa).

Con la excavación realizada en la ladera más una excavación adicional de 12 m en la Urbanización Mirador de Yesa se consigue garantizar la estabilidad de la ladera, tanto para la superficie principal de rotura SPR como para la superficie inferior de rotura SIR.

Sin embargo, para la estabilización del Deslizamiento del Inglés, se considera necesario el cosido mediante anclajes de la parte emergida y la excavación en coronación de la parte sumergida, tal y como se muestra en las figuras 4.39 a 4.41 que se presentan a continuación.

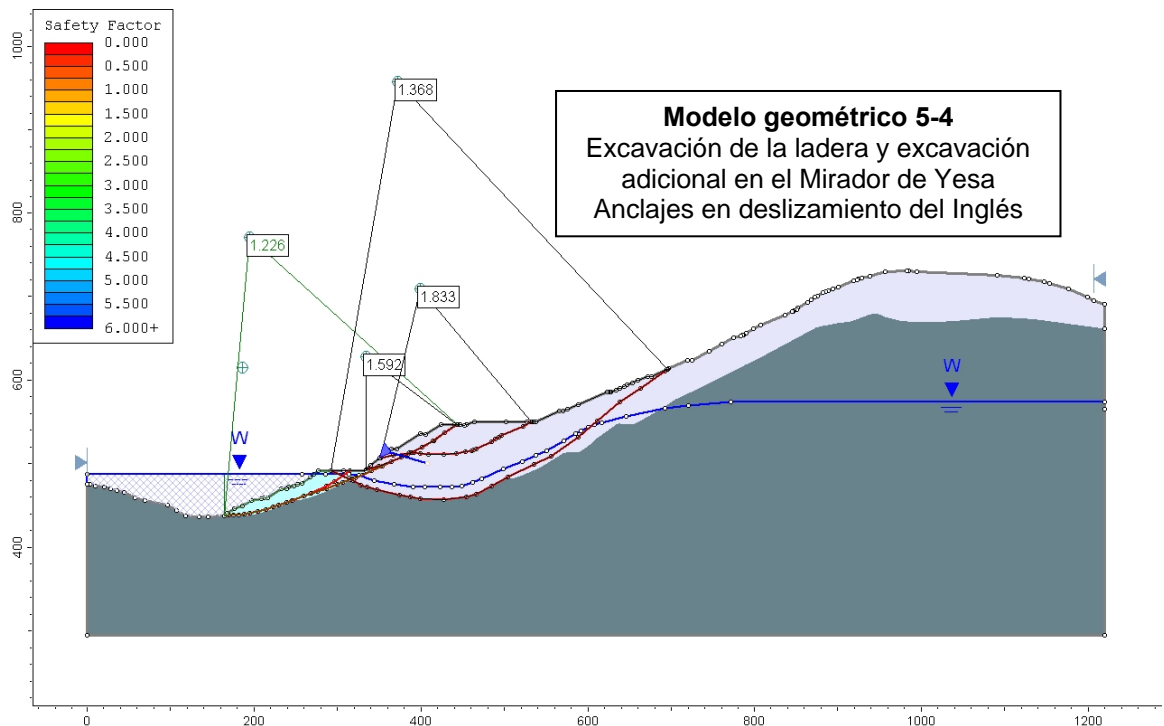


Figura 4.39: Situación de la ladera tras la excavación realizada y con una eventual excavación adicional de 12 m en la urbanización Mirador de Yesa. Anclajes en la parte emergida del deslizamiento del Inglés. Se obtiene un FS= 1.833 para la SPR, FS= 1.368 para la SIR, FS= 1.226 para el Deslizamiento del Inglés (considerando el deslizamiento del Inglés en su conjunto, situación más desfavorable) y FS= 1.592 para el sector emergido del Deslizamiento del Inglés.

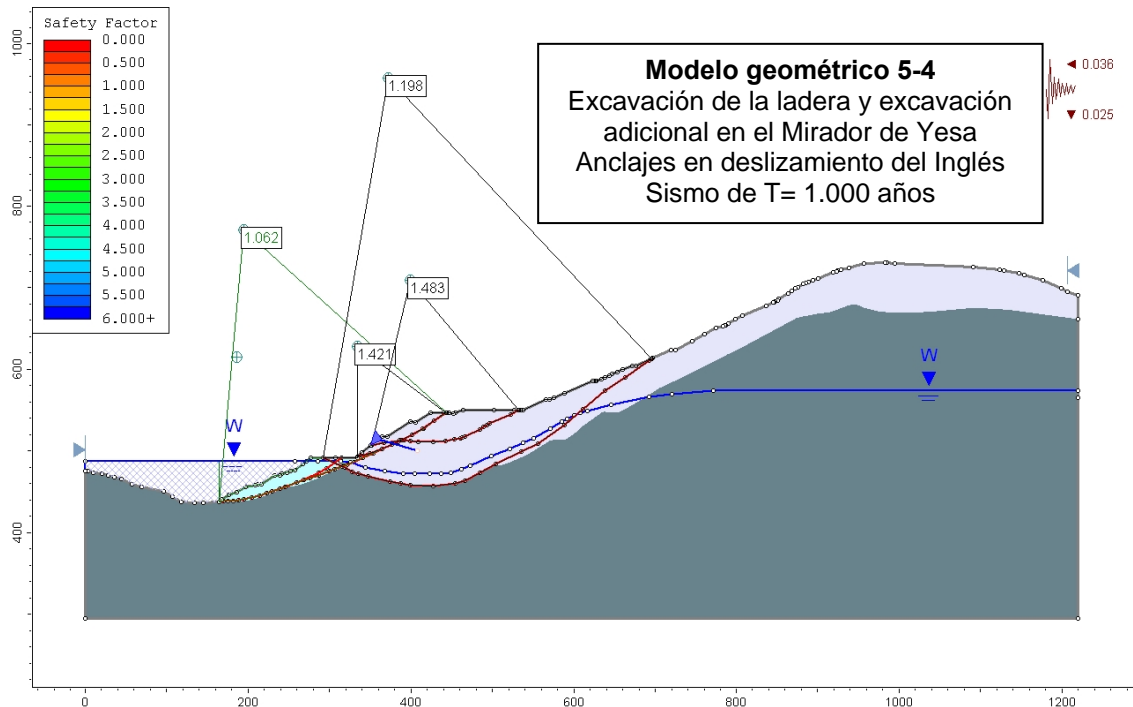


Figura 4.40: Situación de la ladera tras la excavación realizada y con una eventual excavación adicional de 12 m en la urbanización Mirador de Yesa. Anclajes en la parte emergida del deslizamiento del Inglés. Sismo de T= 1.000 años. Se obtiene un FS= 1.483 para la SPR, FS= 1.198 para la SIR, FS= 1.062 para el Deslizamiento del Inglés (considerando el deslizamiento del Inglés en su conjunto, situación más desfavorable) y FS= 1.421 para el sector emergido del Deslizamiento del Inglés.

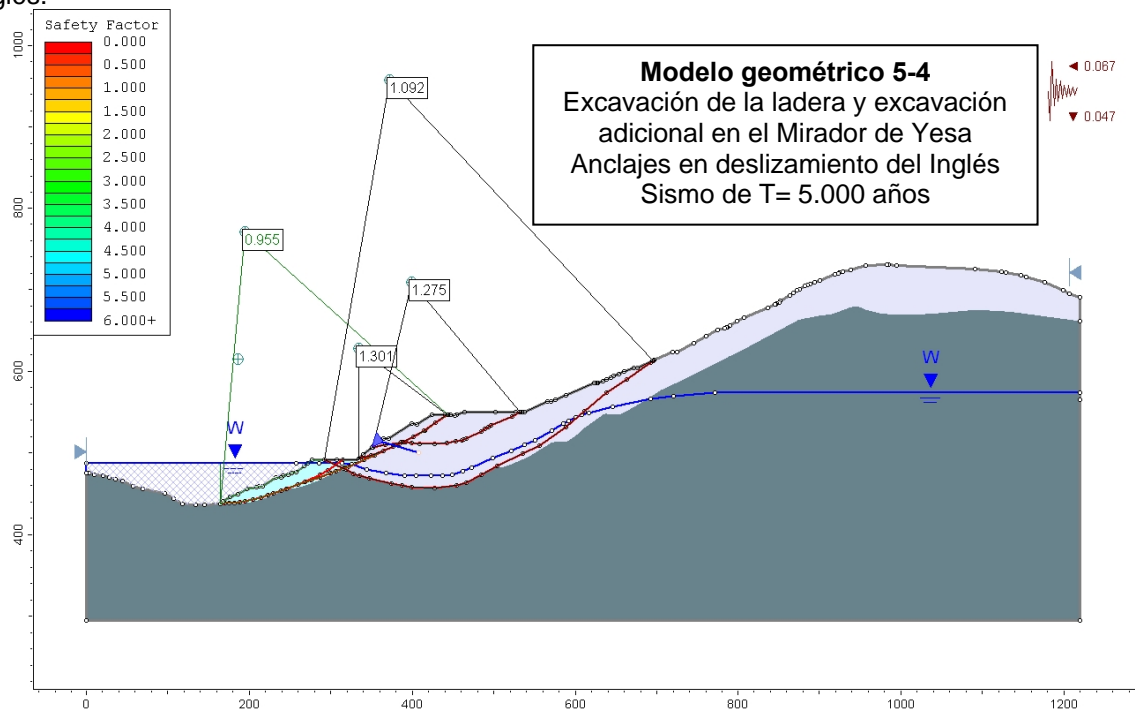


Figura 4.41: Caso anterior para sismo de T= 5.000 años: FS= 1.275 para la SPR, FS= 1.092 para la SIR, FS<1 para el Deslizamiento del Inglés en su conjunto y FS= 1.301 para el sector emergido del Deslizamiento del Inglés.

Conclusiones obtenidas

En los análisis de estabilidad del **Modelo Geométrico 5** (Perfil nº 5 que discurre aguas arriba de la presa actual, por el centro del deslizamiento del Inglés), partiendo de la condición de equilibrio límite de 2013, se deduce que el efecto estabilizador de la **excavación realizada** tiene, en este caso, un efecto menor, alcanzándose un factor de seguridad de **FS= 1.078** para la superficie de rotura principal SPR y **FS= 1.305** para la superficie inferior de rotura SIR. En el caso del deslizamiento del Inglés, este no se ve afectado por la excavación realizada, al encontrarse aguas abajo de la misma.

Con la excavación realizada mejora en gran medida la estabilidad de la superficie inferior de rotura SIR, resultando una configuración estable incluso en la situación de terremoto de diseño de T= 1.000 años (FS= 1.149) y terremoto extremo de T= 5.000 años (FS= 1.060). En ambos casos, tanto la SPR como el deslizamiento del Inglés serían inestables.

Para mejorar la estabilidad de la ladera en este sector y alcanzar unas condiciones de estabilidad suficientes ante cualquier acción sísmica, es necesario optimizar la excavación, rebajando el fondo de la misma en unos 12 m. Pero para ello es necesaria la expropiación previa de la Urbanización Mirador de Yesa.

Si se analiza la estabilidad proporcionada por la **excavación realizada y la excavación adicional en la Urbanización Mirador de Yesa**, se alcanza un factor de seguridad de **FS= 1.353** para la SPR y **FS= 1.366** para la SIR. Si se tiene en cuenta la acción sísmica de T=1.000 años se alcanza un FS= 1.152 para la SPR y FS= 1.214 para la SIR. Si se simula el terremoto extremo (T= 5.000 años) la situación sería estable alcanzándose un FS= 1.025 para la SPR y FS= 1.108 para la SIR.

Además de esta excavación adicional, para lograr la **estabilización del Deslizamiento del Inglés** es necesario recurrir al empleo de **anclajes** al terreno en la parte emergida del deslizamiento, asegurando al tiempo la estabilidad de la coronación de la pantalla de impermeabilización que se situará a la cota 516. Suponiendo una tensión de anclaje unitaria de 400 toneladas por metro lineal, se obtiene un factor de seguridad de **FS= 1.592** en la parte emergida del deslizamiento y FS= 1.226 si se considera el conjunto del deslizamiento.

La parte emergida del deslizamiento del Inglés sería estable ante cualquier acción sísmica considerada. Para mejorar la estabilidad del sector sumergido, sería de interés realizar un descabezado de la coronación del mismo, en la arista externa de la plataforma actual existente junto a la antigua carretera.

4.6. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS

La ladera objeto de estudio se encontraba, a principios de 2013, en una situación de equilibrio límite, en la cual se observaba el desarrollo de un movimiento en el terreno que afectaba a un espesor de hasta 60 m. La instrumentación detectaba además un desplazamiento aún más profundo, en la mitad E de la zona afectada, que se ponía de manifiesto en el entorno del estribo derecho de la presa actual. En ambos casos la cuantía de movimiento era escasa, siendo mucho más evidente en el movimiento superficial (superficie de rotura principal SPR), donde se alcanzó un pico de velocidad de desplazamiento de 40 mm/semana (febrero 2013), si bien la cuantía de desplazamiento acumulada en este episodio de movimiento no supera los 30 cm en el peor de los casos.

Al poco de comenzar las excavaciones en la parte alta de la ladera, la velocidad de movimiento en la SPR se situó por debajo de 1 mm/semana (final de abril 2013), siendo apenas perceptible en el momento actual. La superficie de despegue más profunda SIR tenía una velocidad de movimiento muy lenta, apenas reconocible en la instrumentación.

Ambas superficies de rotura SPR y SIR se han estudiado con detalle en los análisis de estabilidad realizados, así como la eficacia de los tratamientos propuestos para su estabilización, estudiando además su posible optimización.

A modo de síntesis, de los resultados obtenidos en los análisis de estabilidad realizados puede afirmarse lo siguiente:

- Para alcanzar la condición de equilibrio límite mediante análisis retrospectivos (back análisis), con la morfología actual de la ladera, la estructura del macizo rocoso y la geometría de las superficies de despegue, se requieren en todos los casos unos parámetros geomecánicos muy conservadores: cohesión $C=0$ y ángulo de

rozamiento interno $\phi = 16$ a 19° (dependiendo de si se trata de la superficie de rotura principal SPR o la superficie inferior de rotura SIR).

- A la superficie de rotura principal SPR, se le ha asignado una resistencia al corte menor que a la superficie inferior de rotura SIR. La SPR discurre más somera por la masa de Flysch, donde los estratos margosos no son mayoritarios, tienen espesores centimétricos y alternan con estratos de arenisca. Dichos niveles margosos constituyen superficies de debilidad en el conjunto de la masa rocosa a favor de las cuales se favorece el desplazamiento capa sobre capa cuando el buzamiento y la morfología del terreno lo permiten. Por su parte la SIR discurre por la base del Flysch, muy próxima al contacto con las Margas del sustrato, y en este sector destaca el predominio de potentes paquetes de margas, con espesores métricos, sometidos a mayor confinamiento, de características litológicas más homogéneas.
- En los análisis se considera la presencia de agua en el terreno. Para el caso de la SPR se ha tomado el parámetro de presión de poros R_u , al encontrarse claramente por encima del nivel freático de la ladera. Los valores de R_u se han tomado entre 0,04 y 0,06, que equivalen a un grado de saturación del 10-15%. En el caso de la superficie inferior de rotura SIR la saturación se ha analizado mediante la representación del nivel freático que se observa en los piezómetros de la ladera.
- En los análisis realizados se observa como el efecto estabilizador de las actuaciones llevadas a cabo hasta ahora (excavación de 1,5 millones de metros cúbicos de tierras) son muy efectivas en la parte central del deslizamiento. La aplicación de una masa estabilizadora al pie (muros-jardinera) aumenta aún más la estabilidad de la ladera en el entorno de la presa actual y la zona entre presas.
- Aguas arriba de la presa actual, por razones de compatibilidad con las edificaciones de la ladera, el movimiento de tierras tiene un alcance limitado, siendo menos efectivo en este caso. Si se rebaja el fondo de la excavación realizada en unos 10-12 m en el entorno de las urbanizaciones Lasaitasuna y Mirador de Yesa, la estabilidad mejora sustancialmente.

- Con la simple eliminación de tierras de la coronación de la ladera, tal como se ha realizado en el momento actual (a falta de excavar 90.000 m³ pendientes del traslado de una torre eléctrica), se alcanza una mejora del factor de seguridad muy apreciable, pasando de FS= 1.00 a un FS> 1.25 en todos los casos. En la margen E de la masa inestable solo se consigue alcanzar FS= 1.08 en la SPR, por lo limitado de la actuación comentada, si bien se alcanza un FS= 1.30 en la SIR.
- Si la eliminación de tierras se combina con la aplicación de un peso estabilizador al pie, como ocurre en el entorno de la presa actual y la zona entre presas (muros-jardinera), el factor de seguridad de la ladera alcanza valores del orden de FS= 1.34-1.40, dependiendo de si se trata del movimiento más profundo o más somero respectivamente y del caso analizado.
- La aplicación de elementos de anclaje será de gran utilidad en este caso para la estabilización de la zona emergida del deslizamiento del Inglés, garantizando al tiempo la estabilidad de la zona de coronación de la pantalla de impermeabilización que se ejecutará aguas arriba de la presa actual. Para esta finalidad concreta se recomienda su empleo tal como se prevé a partir de la cota 516 del talud comprendido entre la carretera N-240 y la presa actual.
- De los análisis se deduce que las actuaciones que están llevándose a cabo (eliminación de tierras en la parte alta de la ladera y adición de una masa estabilizadora al pie), son las más apropiadas para el tratamiento de una masa potencialmente inestable de estas características, desde un punto de vista técnico y económico. Dichas actuaciones garantizan la estabilidad de la misma incluso en el caso extremo de terremotos con periodo de retorno de hasta T= 5.000 años (sismo extremo).
- Las actuaciones en ejecución son susceptibles de optimizarse aún más, si la excavación se amplía al pie de la misma, hasta alcanzar una cota de 10 a 12 m inferior a la actual. De este modo se consigue una gran mejora en la estabilidad de la ladera, si bien para ello sería necesaria la expropiación previa de parte de la urbanización Lasaitasuna y la totalidad de la urbanización Mirador de Yesa.

- Las actuaciones que se están llevando a cabo, incluso con las adaptaciones que se propone para su optimización, garantizan la seguridad de la ladera, proporcionando un incremento del factor de seguridad de al menos un 30% de media. En estas condiciones la ladera será estable ante cualquier acción previsible, incluso aquellas con periodo de recurrencia extremo. Es decir, la ladera será suficientemente segura en su conjunto, superándose claramente el valor mínimo exigible de $FS= 1.25$.
- A pesar de que en la ladera se alcanzará un nivel de seguridad que, sin lugar a dudas, garantizará la estabilidad de la ladera y la seguridad de las presas y embalse, no parece posible alcanzar, con actuaciones de alcance razonable, lo exigido actualmente por el Código Técnico de la Edificación como valor global de estabilidad para una ladera con presencia de edificaciones (tabla 2.1 DB SE-C). Ante la imposibilidad de alcanzar dicho valor, que por otra parte pocas laderas edificadas en zonas de montaña cumplirían, no es descartable la expropiación de las viviendas afectadas, permitiendo así la optimización máxima de la excavación de la ladera, alcanzando de este modo valores de $FS > 1.40$ de media.

4.7. CAUSAS DEL PROCESO DE INESTABILIDAD

4.7.1 DISCUSIÓN SOBRE EL ORIGEN

El inicio del movimiento del terreno más somero reconocido, de hasta 60 m de profundidad, ha coincidido en el tiempo con el retaluzado llevado a cabo en la margen derecha del embalse. Este retaluzado pretendía regularizar la superficie de la margen derecha y aislar a los depósitos de Flysch de Yesa de los agentes ambientales, los cuales provocan en estos materiales un gran deterioro a medio plazo.

La eliminación de materiales en la zona del pie de la ladera, precisamente donde el buzamiento de los estratos de flysch es favorable por efecto de una estructura sinclinal que invierte el buzamiento general de la ladera, parecía a priori, y a falta de análisis detallados de la estabilidad de la ladera, el factor desencadenante del proceso de inestabilidad ocurrido.

Sin embargo, una vez realizados los análisis de estabilidad pudo comprobarse que la contribución de la excavación realizada en 2011-2012 al factor de seguridad es muy escasa, pues suponía una reducción del factor de seguridad de 3 centésimas. Es evidente que la excavación realizada en 2011-2012 fue perjudicial para la estabilidad de la ladera, aunque sea en un pequeño porcentaje, pero no parece en sí misma la causa determinante, tal y como a continuación se expone, sino un factor condicionante más.

Un mayor efecto sobre la estabilidad debió tener, sin duda, la excavación realizada en 2003 para el emplazamiento del estribo derecho de la nueva presa. En aquella ocasión se eliminaron volúmenes significativos de materiales de la ladera. Según los análisis de estabilidad realizados, dicha excavación debió contribuir a reducir el factor de seguridad de la ladera en unas 20 centésimas.

Sin embargo mayor aún fueron las excavaciones que se llevaron a cabo para la construcción de la presa actual. En las primeras décadas del siglo pasado se llevaron a cabo excavaciones en la ladera derecha y se eliminaron grandes volúmenes de depósitos de ladera, roca alterada, etc., cuya localización constituía una masa de efecto estabilizador para la ladera.

El movimiento más profundo, detectado hasta el momento actual únicamente por los inclinómetros y deducido del ligero levantamiento que sufre el bloque 0 de la presa, que puede alcanzar un máximo de 75-80 m de profundidad, podría llevar activo desde hace décadas, posiblemente desde la construcción de la presa. Parece muy probable que los deslizamientos antiguos observados, de alcance local, (p.e. deslizamiento del Inglés), no fueran sino reactivaciones locales de un gran movimiento que ha debido desplazarse a una velocidad extremadamente lenta, compatible con la ocupación de la ladera por carreteras, viales, viviendas, tendidos eléctricos, etc.

En la ladera se observan anomalías morfológicas en su superficie, bien visibles en el modelo digital del terreno, que ponen de manifiesto la existencia de paleodeslizamientos coincidiendo con la zona superior de la zona de estudio actual. Estos parecen indicar la preexistencia de deslizamientos en la ladera derecha.

Sin embargo, la excavación realizada en la ladera, para la eliminación de tierras en la parte superior de la masa desplazada, muestra que dichos deslizamientos tenían carácter somero, afectando a espesores de materiales moderados (no más de 10-15 m). En estos paleodeslizamientos se observa como la estructura está trastocada respecto al terreno circundante y presenta deformación dentro de la propia masa.

En el resto de la ladera afectada por el movimiento del terreno se ha observado una perfecta continuidad entre el terreno contenido dentro de la masa desplazada y el terreno situado fuera de los límites de la rotura. Incluso en los sondeos realizados, la roca situada por encima y por debajo de los planos de despegue no mostraba diferencias entre sí: se obtenía, en todos los casos, una buena recuperación de las capas margosas intercaladas en el flysch, y no se observaba discontinuidad alguna diferente de las habituales en los contactos litológicos de los estratos.

Estos últimos argumentos harían pensar en un desplazamiento de nueva génesis, sin embargo, al realizar los análisis de estabilidad, reproduciendo los procesos de movimiento observados, se ha visto que los parámetros geomecánicos a considerar para que se produzca en el modelo la rotura estudiada son muy conservadores. Para que se reproduzca la inestabilidad hay que descartar por completo la cohesión, considerar un ángulo de rozamiento interno extremadamente bajo (16° - 19°) y considerar un cierto grado de

saturación del terreno. Esta afirmación es válida tanto para la superficie principal de rotura SPR como para la superficie inferior de rotura SIR.

Esto implica que la ladera tenía que estar necesariamente en condiciones residuales por procesos previos de movimiento. Dichos movimientos no parecen obedecer a un peleodeslizamiento tal y como se conocen en estas laderas, dada la continuidad que se observa entre la masa movida y la masa autóctona. Pero podrían ser movimientos que tuvieran su origen hace décadas, durante la propia ejecución de la presa actual. Esta afirmación se basa en dos evidencias claras:

- La gran cantidad de grietas y desperfectos que ha sufrido históricamente las edificaciones de la Urbanización Lasaitasuna, pues se aprecia como la mayoría de las grietas observadas corresponden a reaperturas de grietas ya tratadas con anterioridad, pues aparecen rejuntadas con mortero y otros materiales similares en la mayoría de los casos.

La mala calidad de las edificaciones y de las cimentaciones ha hecho posible que el movimiento del terreno sea visible en muchas edificaciones, tanto en las propias viviendas como en las construcciones anexas a las mismas (muros de contención, bordillos, etc.).

- El empuje que históricamente ha sufrido la presa actual de Yesa procedente del estribo derecho, que no ha permitido la apertura de las juntas de dilatación entre módulos de la propia presa y que en los últimos años ha registrado una ligera elevación del módulo 0, el primero del estribo derecho, de unos 13 mm en total.

La excavación reciente ha podido agravar la situación de inestabilidad, aunque como se observa en los análisis, su efecto ha debido ser mínimo en la ladera, modificando el factor de seguridad en la ladera en un 3% aproximadamente. No obstante ha podido ser la causa de que el movimiento, antes apenas perceptible, haya pasado a ser registrado por los elementos de auscultación.

El movimiento registrado es, no obstante, de escasa magnitud, dado que durante finales de 2012 y los 4 primeros meses de 2013, el desplazamiento máximo registrado no superó los 25 cm, si bien afecta a un gran volumen de materiales.

Se ha comprobado, tanto en los análisis de estabilidad realizados como en los movimientos registrados por la instrumentación, como la ladera es sensible al grado de saturación del terreno y a las lluvias. Lo extraordinario de las precipitaciones del pasado año pudo, sin duda, contribuir a acelerar y agravar un proceso que antes era imperceptible.

4.7.2 CONCLUSIONES

Por lo anteriormente expuesto parece claro que las superficies de rotura estudiadas han debido tener cierta actividad desde hace décadas, pero la escasa magnitud de su movimiento ha hecho que pasara inadvertido. De hecho los movimientos no han mostrado evidencias visibles al pie de la ladera, ni en el entorno de la presa actual, registrándose únicamente mediante la instrumentación.

Los daños observados históricamente en la Urbanización Lasaitasuna puede que tuvieran relación, en parte, con este fenómeno. En la urbanización Mirador de Yesa no se observan daños al tratarse de una edificación más reciente, de mejor calidad constructiva y ocupar una posición más centrada en la masa movilizada, que limita la presencia de movimientos diferenciales.

Se demuestra que debía tratarse de un movimiento preexistente, extremadamente lento y compatible con la urbanización de la ladera.

Las excavaciones llevadas a cabo para el acondicionamiento de la ladera derecha del embalse y las fuertes precipitaciones registradas en la zona el pasado año, han hecho posible que el movimiento haya mostrado su actividad con mayor claridad, pasando de ser prácticamente inapreciable a poder registrarse instrumentalmente.

En la cavidad que ha aparecido con la excavación reciente en la margen Oeste de los deslizamientos, entre las bermas 2 y 3, se observa un desplazamiento de más de 1 m en el terreno, lo que confirma que hay una gran parte del movimiento que se había producido con anterioridad al episodio reciente, donde los desplazamientos registrados no deben haber superado los 30 cm en el peor de los casos.

5. INCIDENCIA DE LOS FACTORES CONSIDERADOS EN LA SEGURIDAD DEL EMBALSE

El movimiento más superficial asociado a la superficie de rotura principal SPR, no representaba un riesgo para la presa en servicio, dado que la masa movilizada se situaba aguas arriba de la misma, quedando el pie del deslizamiento a una cota superior respecto a la coronación de la presa. Sin embargo, se consideraba necesaria su estabilización para evitar un progresivo deterioro del talud de la ladera derecha, que se produciría a medio-largo plazo, con desprendimientos del hormigón proyectado, inestabilidades locales, etc.

Además, era necesaria la estabilización del movimiento del terreno para poder dar servicio nuevamente a la carretera nacional, descartar cualquier afección al estribo derecho de la nueva presa y evitar el progreso de los daños que sufren las viviendas situadas aguas arriba de la misma. Dichas viviendas, concretamente las de la urbanización Lasaitasuna, presentan una construcción de muy baja calidad, lo que ha agravado los daños producidos por el movimiento del terreno.

El deslizamiento definido por la SPR sí hubiera afectado al estribo derecho de la nueva presa, por lo que para la ejecución de la misma, previamente debía estabilizarse el movimiento del terreno.

El movimiento profundo del terreno asociado a la superficie inferior de rotura SIR, que se intuía en los inclinómetros de la ladera, si parece tener incidencia en la presa actual. El movimiento profundo se considera la causa del leve levantamiento que se registra en los primeros bloques de la presa actual y de la compresión que se observa en las juntas entre bloques de hormigón.

La estabilidad del movimiento profundo hubiera mejorado con la ejecución de la nueva presa de materiales sueltos, dado que este se vería estabilizado en gran medida por la gran adición de tierras que representará la nueva presa en la base de la ladera. No obstante, se consideró necesaria su estabilización previa mediante la eliminación de un gran volumen de materiales de la parte alta de la ladera.

En definitiva, para evitar cualquier riesgo sobre la presa actual y sobre la nueva presa era imprescindible la estabilización previa de la ladera. El tratamiento está centrado principalmente en la redistribución de masas, tal y como se comenta en los apartados anteriores. La eliminación de masa en la mitad superior de la ladera provocará una mejora radical del factor de la seguridad de la ladera, lo que se traduce en la estabilización de los movimientos asociados a la superficie principal de rotura SPR y a la superficie inferior de rotura SIR.

La adición de un peso estabilizador al pie de la ladera (muros-jardinera) contribuye de forma eficaz a mejorar la estabilidad de la ladera, resultando una medida complementaria a la excavación realizada, que además supondrá un sellado de la base de la ladera, aislándola del agua embalsada y de sus variaciones de nivel en el futuro.

Las actuaciones que se están llevando a cabo harán posible, con total certeza, que la ladera se estabilice por completo, mejorando la situación de la presa actual y permitiendo la construcción de la nueva presa con totales garantías.

En el caso del Deslizamiento del Inglés, situado aguas arriba de la presa actual, se presentan dos ámbitos bien distintos. La parte sumergida sufre ligeros desplazamientos con cada desembalse anual, y el embalse lleva conviviendo con él desde la construcción de la presa actual. La parte emergida consiste en un movimiento superficial del talud como consecuencia del desplazamiento de la masa inferior. Tanto uno como otro tienen escasa magnitud, siendo los movimientos registrados de escala milimétrica.

Dicho deslizamiento no tendría repercusión sobre el embalse en el futuro, pero se va a actuar sobre ambas masas inestables para mejorar su situación de estabilidad. En la parte emergida se va a construir un muro anclado a partir de la cota 516 que estabilizará el frente del talud y asegurará la estabilidad de la zona de coronación de la pantalla de impermeabilización que va a construirse aguas arriba de la presa actual. En la parte sumergida se va a proceder a la excavación de la arista exterior de la plataforma actual existente junto a la antigua carretera, de modo que mejorará la estabilidad de dicha masa inestable.

Como conclusión cabe señalar que cuando finalicen las obras de estabilización que se están llevando a cabo, la ladera no tendrá incidencia alguna sobre las presas o el embalse.

6. SUFICIENCIA DE ESTUDIOS EN LA LADERA

En la situación actual se considera que la ladera está suficientemente estudiada, al menos desde el punto de vista del número y alcance de las investigaciones in situ y de la instrumentación geotécnica.

La deficiencia principal se encuentra en la inoperatividad de gran parte de los inclinómetros instalados por efecto del propio movimiento del terreno, puesto que dichos inclinómetros, en cuanto se alcanzan deformaciones en un plano de despegue de 8-10 cm, suelen bloquearse para el paso del elemento de lectura. Estos inclinómetros están siendo repuestos, dado que el movimiento de la ladera se encuentra estabilizado, ampliándose los puntos de observación también fuera del ámbito de los deslizamientos estudiados.

En el talud resultante de la excavación realizada, constituido por 8 bancos separados entre sí por 7 bermas, se instalarán también nuevos inclinómetros para un control total de la estabilidad de la ladera en profundidad. Estos quedarán alineados según perfiles a lo largo de la máxima pendiente del terreno, penetrando, en todos los casos, en el sustrato de margas.

Con anterioridad a la ejecución de las obras y durante su desarrollo, se ha llevado a cabo una auscultación topográfica detallada, que ha permitido delimitar el movimiento en superficie y llevar un seguimiento de su evolución. Una vez finalicen las obras, en estado muy avanzado a día de hoy, debe continuarse con la auscultación topográfica, que aporta información muy valiosa en este caso y permite un seguimiento continuo, casi a tiempo real, del eventual movimiento del terreno y su alcance en superficie.

El movimiento parece encontrarse cerca de su estabilización definitiva, puesto que en la actualidad se encuentra detenido. La auscultación permitirá llevar a cabo un seguimiento de la estabilidad de la ladera en el futuro, garantizándose así la seguridad de las presas y embalse.

También debe seguir realizándose en la ladera una auscultación piezométrica, con la finalidad de estudiar eventuales elevaciones del nivel freático o incrementos del grado de saturación del terreno. Pueden aprovecharse sondeos inclinométricos que ya no están

operativos, por el movimiento producido en el terreno, para instalar en el fondo de los mismos piezómetros cerrados, que permitan estudiar las presiones intersticiales que puedan darse en el entorno de las superficies de rotura analizadas. De forma complementaria es importante disponer también de piezómetros abiertos que permitan llevar un seguimiento de la evolución del nivel freático que se localiza en el tercio inferior de la formación del Flysch de Yesa, cuya situación ha presentado escasa variación a lo largo del tiempo, por la mala conexión hidráulica con el embalse y la impermeabilidad del sustrato de Margas de Pamplona.

En el futuro la conexión hidráulica de la ladera con el embalse será nula, dada la impermeabilización que se llevará a cabo en el cuerpo de la nueva presa, en el espacio entre presas (muros-jardinera) y aguas arriba de la presa actual (pantalla de impermeabilización).

Los desplazamientos observados en el terreno ponen de manifiesto que se trata de movimientos de escasa actividad, aunque se vea afectado un importante volumen de materiales, por lo que será plenamente controlable con las actuaciones que se están llevando a cabo. Esta actividad escasa será, a partir de ahora nula, salvo en zonas puntuales asociadas a efectos locales, lo que hace necesario que la auscultación de la ladera deba realizarse con elementos de gran precisión, su instalación sea muy cuidada, se lleve un mantenimiento escrupulosos de dichos elementos y la lleven a cabo técnicos de máxima competencia, dado que las magnitudes a medir serán muy escasas. Sin embargo, el ámbito de trabajo es una ladera de gran extensión, alcanzando además una profundidad importante en el terreno.

7. CONCLUSIONES

En el presente estudio se han analizado las condiciones de estabilidad de la ladera derecha del embalse de Yesa en la situación actual, una vez llevadas a cabo una gran parte de las actuaciones previstas para su estabilización definitiva. Se ha evaluado la validez de las actuaciones en ejecución, analizando pequeñas variaciones que permitan alcanzar la máxima eficacia posible de las mismas.

Se ha comprobado que las actuaciones que se están llevando a cabo en la ladera garantizarán su estabilidad a largo plazo, proporcionando al terreno un amplio margen de seguridad, mejorando la situación de la presa actual y permitiendo la construcción de la nueva presa con totales garantías en lo que respecta a la estabilidad global del terreno.

Los movimientos observados en el terreno ponen de manifiesto que se trataba de un desplazamiento de escasa actividad, aunque se viera afectado un importante volumen de materiales. Dichos movimientos están siendo ya controlados con las actuaciones en curso, las cuales consisten en:

- la excavación de un volumen de 1,5 millones de metros cúbicos de terreno en la mitad superior de la ladera, ya prácticamente finalizada, a falta de la eliminación de un volumen de 90.000 m³ sobre la urbanización Mirador de Yesa, pendientes del inminente traslado de una torre eléctrica. Esta actuación proporciona, por sí misma, un aumento del factor de seguridad global de la ladera por encima de 1.25.
- la construcción al pie de la ladera, sobre el estribo derecho de la presa actual y en el espacio entre las dos presas, de unos muros-jardinera de hormigón, que aportan un peso estabilizador al pie que contribuyen en gran medida al incremento de la estabilidad, alcanzándose, de forma conjunta con la excavación realizada, valores del factor de seguridad de por encima de 1.35.

El movimiento de tierras realizado presenta menor eficacia en el sector de aguas arriba de la presa actual, dado que para no afectar a la Urbanización Mirador de Yesa la excavación ha sido limitada en esa zona. Para obtener un factor de seguridad equivalente al resto de la

ladera es necesario ampliar la excavación en este sector de la ladera, rebajando el fondo de la excavación actual en 12 m. Para ello es necesario expropiar previamente dicha urbanización.

En general, la optimización de la actuación que se está llevando a cabo pasa por rebajar la excavación realizada en unos 10-12 m de media en toda la zona tratada, lo que es incompatible a día de hoy con la presencia de las urbanizaciones. De esta forma se alcanzaría un factor de seguridad en la ladera que, en su conjunto, superaría un valor de 1.40.

Las actuaciones que se están llevando a cabo, incluso con las adaptaciones que se propone para su optimización, garantizan la seguridad de la ladera, proporcionando un incremento del factor de seguridad de al menos un 30% de media. En estas condiciones la ladera será estable ante cualquier acción previsible, incluso aquellas con periodo de recurrencia extremo. Es decir, la ladera será suficientemente segura en su conjunto, superándose claramente el valor mínimo exigible de $FS= 1.25$ (Eurocódigo 7-Proyecto Geotécnico. Parte 1).

Sin embargo, a pesar de que en la ladera se alcanzará un nivel de seguridad que, sin lugar a dudas, garantizará la estabilidad de la ladera y la seguridad de las presas y embalse, no parece posible alcanzar, con actuaciones de alcance razonable, lo exigido actualmente por el Código Técnico de la Edificación como valor global de estabilidad para una ladera con presencia de edificaciones: $FS=1.80$ (tabla 2.1 DB SE-C). Ante la imposibilidad de alcanzar dicho valor, que por otra parte pocas laderas edificadas en zonas de montaña cumplirían, no es descartable la expropiación de las viviendas afectadas, permitiendo así la optimización máxima de la excavación de la ladera, alcanzando de este modo valores de $FS>1.40$ de media.

Es necesaria la restitución de la red inclinométrica, en lo que se está trabajando desde hace meses, instalando nuevos elementos de medida en la excavación realizada y sustituyendo los inclinómetros que se vieron afectados por el movimiento de la ladera.

En el futuro debe continuarse con la auscultación inclinométrica y topográfica. Así mismo debe llevarse un seguimiento piezométrico, con la finalidad de estudiar eventuales elevaciones del nivel freático o incrementos del grado de saturación del terreno. De esta forma será posible llevar a cabo un seguimiento de la estabilidad de la ladera en el futuro, garantizándose así la seguridad de las presas y del embalse.

Madrid, 24 de enero de 2014

El presente documento consta de 107 páginas, habiendo sido redactado por los técnicos que a continuación suscriben:



J. Ángel Rodríguez Franco
Geólogo. Colegiado nº 2.123
Máster en Ingeniería Geológica (U.C.M.)



Luis González de Vallejo
Dr. en Geología. Colegiado nº 13
Catedrático de Ingeniería Geológica (U.C.M.)
Ingeniero Geólogo (Imperial College, Londres)