

Procedimiento práctico para evaluar la estabilidad y probabilidad de falla de taludes de corte en el área urbana de Tijuana, México.

Practical procedure for stability assessment and failure probability of cut slopes in the Tijuana urban area, Mexico.

PhD. Aldo Onel Oliva-González¹, Ing. Marco Antonio Berumen-Rodríguez², Ing. David Mascareño-Jiménez³

¹ Investigador afiliado al Grupo ITEICO Euroamericano, Tijuana, Baja California, México, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6119-8602>, Email: aldo.oliva@iteico.com

² GEOSERVICIOS, Playas de Rosarito, Baja California, México, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2042-1059>, Email: geoserviciosmabr@yahoo.com.mx

³ GEOCIM, Tijuana, Baja California, México, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5027-3099>, Email: geocim1@yahoo.com

Como citar: A. O. Oliva –González, M. A. Berumen-Rodríguez y D. Mascareño-Jiménez, "Procedimiento práctico para evaluar la estabilidad y probabilidad de falla de taludes de corte en el área urbana de Tijuana, México", *Rev. Ingenio*, vol. 20, n°1, pp.16-23, 2023, doi: <https://doi.org/10.22463/2011642X.3364>

Fecha de recibido: 6 de mayo de 2022
Fecha de aprobación: 18 de octubre de 2022

RESUMEN

Palabras claves:

Estabilidad de taludes, fallas de taludes, nivel de seguridad, probabilidad de falla.

Las fallas de taludes en el área urbana de Tijuana, afectan cada año gran cantidad de estructuras e infraestructuras, produciendo cuantiosas pérdidas en diversos sectores de la economía. En este trabajo se presenta un procedimiento práctico e innovador para evaluar la estabilidad de taludes de corte en un sector del área urbana, basado en información existente sobre el área de estudio, así como en el juicio y experiencia de los autores. Dicho procedimiento permite determinar el nivel de seguridad de taludes con diferentes geometrías, condiciones de sismicidad y de saturación; y estimar la probabilidad de que se presenten fenómenos de inestabilidad, a partir de una correlación entre los factores de seguridad y la probabilidad anual de fallas, o mediante la aplicación de un modelo probabilístico basado en los registros históricos de fallas ocurridas en zonas donde los factores condicionantes y desencadenantes de inestabilidad sean similares a los del área de estudio. La aplicación del enfoque y procedimiento en algunos casos reales, demuestran que son viables y que podrían ser una herramienta de mucha utilidad tanto para el diseño de taludes, como para la corrección de las fallas que se producen en estas estructuras térreas.

ABSTRACT

Key words:

Slope stability, slope failure, safety level, probability of failure.

Slope failures in the Tijuana urban area destroy a large number of structures and infrastructures every year, producing large losses in various sectors of the economy. In this paper, a practical procedure is presented to evaluate the stability of cut slopes in a sector of the urban area, based on existing information about the study area, and the judgment and experience of the authors. This procedure allows determining the safety level of slopes with different geometries, seismicity and saturation conditions, as well as estimating the probability of occurrence of instability phenomena, based on a correlation between safety factors and the annual probability of failure, or by applying a probabilistic model derived from historical records of past failures. The application of the approach and procedure in some real cases show that they are feasible and could be a very useful tool both for the design of slopes and for the correction of the failures that occur in these earth structures.

1. Introducción

Las fallas de taludes son el producto de la combinación de condiciones geomorfológicas, geológicas, geotécnicas e hidrológicas, y la modificación de ellas por procesos geodinámicos, uso del suelo y actividades humanas, así como por la frecuencia, magnitud e intensidad de fenómenos naturales como lluvias y terremotos. La ocurrencia de fallas está sujeta a muchos grados de incertidumbre debido a que la masa de terreno potencialmente inestable puede estar constituida por materiales diferentes, y presentar diversos tipos de movimientos, velocidades y mecanismos de rotura. A esto se suman la confiabilidad de los datos para la modelación del problema, así como las incertidumbres humanas y de

los modelos matemáticos utilizados para el análisis de la estabilidad [1]. Las transformaciones antropogénicas propias del crecimiento acelerado y la inadecuada planeación territorial de muchas ciudades, generan condiciones propicias para la ocurrencia de fallas geotécnicas. Especialmente la conformación de taludes mediante cortes en el terreno, es un importante factor desencadenante de inestabilidad [2].

Una falla de talud es el proceso de movimiento hacia abajo de una masa de terreno a lo largo de una superficie (plana o curva) con respecto a la masa estática restante. Las causas probables y sus mecanismos básicos suelen tener un comportamiento progresivo en el tiempo, por lo que la

Autor para correspondencia

Correo electrónico: aldo.oliva@iteico.com (Aldo Onel Oliva González)

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña
Artículo bajo la licencia CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>)



resistencia a cortante máxima a lo largo de la superficie de rotura generalmente se considera aplicable al análisis de las primeras fallas; mientras que, en el análisis de la posible reactivación de antiguos movimientos, es recomendable considerar la resistencia a cortante residual [3]. Para determinar si un talud es estable generalmente se utiliza el factor de seguridad, cuya definición y valores a lo largo de la superficie potencial de falla, ha sido ampliamente estudiado y debatido por diferentes autores [4-5-6-7-8-9].

Para resolver problemas de inestabilidad de un talud es importante determinar correctamente su nivel de seguridad, manejando adecuadamente los fundamentos geotécnicos que controlan su estabilidad. Para ello, existen diversos métodos y procedimientos que permiten determinar el factor de seguridad, pero casi todos brindan respuestas similares cuando se aplican correctamente [10-11-12-13]. Si el factor de seguridad es menor que ciertos valores límites admisibles que garantizan la estabilidad, el talud se considera potencialmente inestable y es conveniente estimar la probabilidad de que la falla ocurra o no. En la literatura técnica se reportan tres formas aceptadas para estimar las probabilidades de fallas de taludes: en base a datos históricos de frecuencias de observaciones, a partir del modelo matemático de la teoría de la probabilidad, o mediante la cuantificación de probabilidades subjetivas utilizando el juicio de experto.

La ciudad de Tijuana, México, es un ejemplo de expansión urbana rápida y desordenada. Con registros históricos de velocidades de crecimiento territorial de hasta 3.5 hectáreas/día y tasas de crecimiento poblacional de más de 6% anual, el área urbana continua su avance hacia zonas de topografía irregular donde predominan cañones y laderas de fuertes pendientes. En este escenario, los factores antropogénicos, unidos a la complejidad geomorfológica, geológica, geotécnica, y a la actividad sísmica, hacen que el riesgo de ocurrencia de fallas de taludes alcance niveles difíciles de predecir [13-14]. En el área urbana de Tijuana coexisten desarrollos residenciales e industriales construidos en zonas de laderas potencialmente inestables y sobre masas de terrenos removidas por antiguos deslizamientos de tierra [15]. En este artículo se presenta un procedimiento para evaluar la estabilidad y probabilidad de fallas en un sector del área urbana de Tijuana, elaborado a partir de un enfoque práctico basado en la información geológica y geotécnica existente, el registro histórico de fallas ocurridas, el criterio de expertos y la experiencia de los autores.

1.1 Falla de taludes de corte en el área urbana de Tijuana

En los últimos 3 años, en 5 barrios del área urbana se reportaron fallas de taludes de corte, que produjeron daños severos en al menos 25 viviendas y pusieron en riesgo estructuras e infraestructuras ubicadas en el entorno de las zonas afectadas (Figura 1).



Figure 1. Sitios afectados por fallas de taludes en el área urbana de Tijuana.

1.2 Factores condicionantes y desencadenantes de la inestabilidad de taludes

1.2.1 Factores condicionantes. Están relacionados con características del terreno que favorecen su inestabilidad, entre los que destacan por su significativa influencia, las condiciones geológicas, geotécnicas, geomorfológicas y tectónicas. En la subcuenca Tijuana, que se extiende hasta la ciudad de San Diego, California (Estados Unidos

de América), se depositaron las formaciones geológicas Rosarito Beach y San Diego. La Fm. Rosarito Beach descansa sobre depósitos continentales de lodolitas y areniscas lacustres sobre los cuales se depositó la Fm. San Diego, formada por dos unidades litoestratigráficas: una inferior compuesta predominantemente de areniscas finas, y una superior formada por areniscas y conglomerados (Figura 2). Minch (1967) reconoce otros dos miembros de la Fm. San Diego: el inferior, compuesto de areniscas de grano

fino a medio con lentes ocasionales de conglomerados; y el superior, constituido por areniscas de grano medio a grueso y conglomerados arenosos. Básicamente, la estratigrafía predominante en el área urbana está formada por: limolita-arenisca, basalto, arenisca-conglomerado, aluvión, conglomerado, arenisca, y roca ígnea [17-18-19]; pero la mayor parte de la ciudad está construida sobre depósitos superficiales constituidos por boleos, gravas, arenas, limos y lentes de arcillas intercalados.

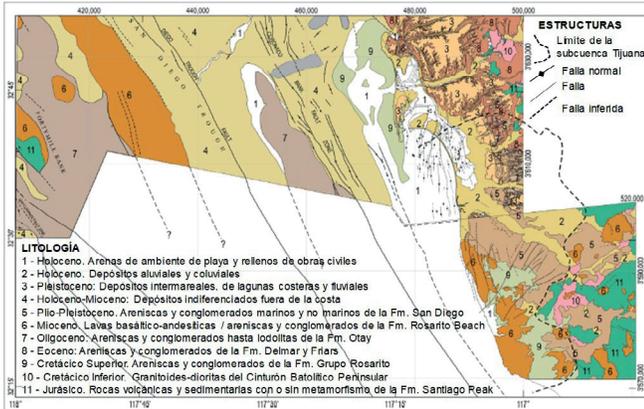


Figure 2. Mapa geológico del área San Diego, California, EEUU – Tijuana, Baja California, México. Fuente. [16].

El rasgo geomorfológico principal de Tijuana es el río del mismo nombre, que recorre una planicie de aproximadamente 2 km de ancho y 18 km de longitud. Hacia el noreste del río destaca un área de mesetas y, al suroeste, un macizo montañoso que se caracteriza por una alta densidad de disección de drenajes naturales, unos hacia el río Tijuana y otros hacia el océano Pacífico [20-14]. Esta geomorfología ha propiciado el crecimiento de la ciudad en la cuenca del río y en sus microcuencas tributarias, por lo que más de la mitad del área urbana está ubicada en laderas con pendientes superiores al 35% donde el terreno es debilitado por la erosión de las corrientes de agua.

Tijuana se encuentra ubicada en una zona tectónicamente activa, conocida como “Zona de Cizalla del Sur de California” [21], limitada al norte por las sierras transversales del oeste de Estados Unidos, al sur por el sistema de la falla de “Agua Blanca”, al este por la zona de la falla de “San Andrés” y al oeste por el sistema de falla de “San Clemente”. En el norte de la península de Baja California, se desarrolla un complejo arreglo de fallas sísmicamente activas orientadas al NW que generan una condición de alto riesgo sísmico (Figura 2). Este marco tectónico constituye un importante agente generador de vibraciones y fuerzas inerciales que detonan fenómenos de inestabilidad del terreno, ante los cuales están expuestos con alta vulnerabilidad varias zonas residenciales e industriales del área urbana [22-23].

1.2.2. Factores desencadenantes. Los factores desencadenantes modifican las condiciones iniciales y corresponden a características regionales o locales naturales y antrópicas que pueden afectar de manera significativa la estabilidad del terreno y detonar fallas de taludes. En el área urbana de Tijuana, el intemperismo, la erosión y la actividad humana son los factores más importantes y producen acciones desestabilizadoras como: cambios en la geometría del terreno; aumento de cargas; modificación de los flujos de agua superficiales y subterráneos; cambios en la cobertura vegetal; y deforestación [15]. Las geoformas predominantes en el paisaje urbano y la presencia de grandes cárcavas y surcos profundos en taludes y laderas, reflejan los efectos del intemperismo y la erosión sobre los materiales expuestos en la superficie del terreno. En relación a la actividad humana, los cortes en laderas (sin estudios ni diseños geotécnicos previos), son el factor antrópico que más genera inestabilidades del terreno y la principal causa de fallas en taludes del área urbana de Tijuana.

2. Metodología

Se describe la metodología utilizada para desarrollar un procedimiento que permite evaluar la estabilidad de taludes en zonas del área urbana, que son susceptibles a la ocurrencia de fenómenos de inestabilidad del terreno. La metodología contó con las siguientes fases o etapas:

- Identificación de zonas susceptibles a la inestabilidad
- Elaboración de ábacos para determinar los factores de seguridad de los taludes
- Análisis y evaluación de métodos para estimar la probabilidad de falla de los taludes.

2.1 Identificación de zonas susceptibles a la inestabilidad

Los estudios geológico-geotécnicos realizados y los registros históricos de fenómenos de inestabilidad geotécnica, permitieron identificar zonas susceptibles a la ocurrencia de fallas de taludes (Figura 3).



Figure 3. Fallas de taludes y laderas registradas en el área urbana de Tijuana (entre 2010 y 2020).

La mayoría de fallas han ocurrido en la unidad litológica 5 (Areniscas y conglomerados marinos y no marinos de la Fm. San Diego) [16] que, en su estado natural, están constituidos por arenas limosas y arcillosas con gravas y boleos.

2.2 Elaboración de ábacos para determinar factores de seguridad de los taludes

Los ábacos se elaboraron a partir de los factores de seguridad mínimos de taludes de corte en las zonas susceptibles a la inestabilidad (unidad litológica 5, Figura 3). Dichos factores fueron calculados mediante métodos de equilibrio límite, y bajo las siguientes consideraciones:

- Se utilizaron intervalos de valores de parámetros físico-mecánicos del terreno, obtenidos mediante pruebas y análisis de laboratorio (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros geotécnicos considerados en el análisis de estabilidad.

| Tipo de suelo /Fm. Geológica | Peso Volumétrico (KN/m ³) | Ángulo de fricción (grados) | Cohesión (Kpa) |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|----------------|
| Arenas limosas y arcillosas con gravas y boleos / Fm. San Diego | 18 - 21 | 28 - 32 | 10 - 15 |

- Se analizó la estabilidad de taludes de corte con diferentes alturas (H) e inclinaciones (α) entre 26° y 64°, considerando las aceleraciones sísmicas (a) que establece la NTC de Baja California [24], así como diferentes niveles de saturación del terreno (S).
- Se calcularon factores de seguridad mínimos para superficies potenciales de fallas ubicadas por encima y por debajo del pie del talud (Figura 4).

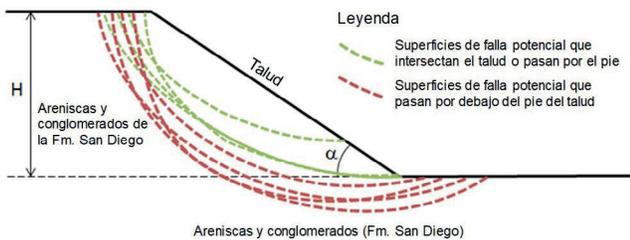


Figura 4. Representación esquemática de las superficies potenciales de falla.

2.3 Análisis y evaluación de la probabilidad de falla de los taludes

Para estimar la probabilidad de falla de los taludes de corte en las zonas susceptibles a la inestabilidad descritas en la sección 2.1., se analizaron y evaluaron los siguientes métodos:

- Modelo probabilístico utilizando los registros históricos de fallas ocurridas (probabilidad temporal

de ocurrencia)

- Correlación basada en proyectos reales de ingeniería y obtenida mediante la cuantificación del juicio de expertos (probabilidad de falla vs factor de seguridad).

2.3.1 Probabilidad temporal de ocurrencia. Se puede estimar a partir de los registros históricos de fallas ocurridos en el área de estudio. Dicha probabilidad se obtuvo utilizando el modelo de Poisson [25], que se expresa matemáticamente mediante la ecuación (1):

$$P(N_L) = 1 - e^{-\frac{T}{RI}}, RI = \frac{t}{N} \quad (1)$$

Donde T es el período de retorno, RI es el intervalo de recurrencia medio histórico, t es el intervalo de tiempo de la base de datos de fallas, y N es la cantidad de fallas registradas.

2.3.2 Probabilidad de falla vs factor de seguridad. Se propone utilizar la correlación entre la probabilidad anual de falla y el factor de seguridad desarrollada por Silva (2008) [26], la cual consideramos adecuada porque cumple con las consideraciones fundamentales de la teoría de la probabilidad y tiene un buen sentido práctico (Figura 5).

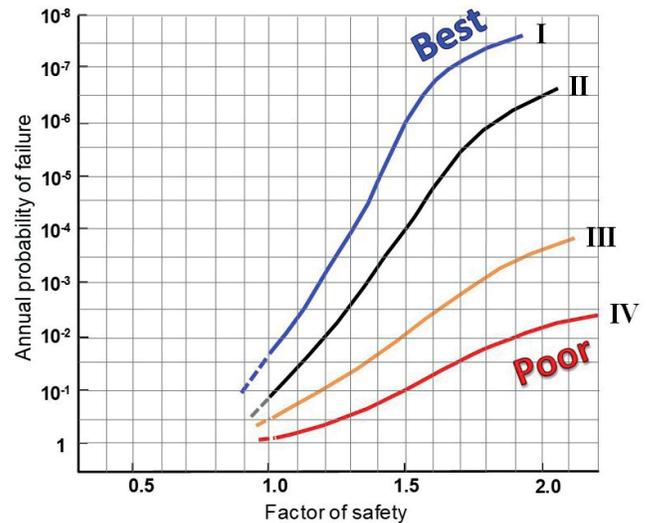


Figura 5. Probabilidad anual de falla vs factor de seguridad. Fuente. [26].

Las curvas de la Figura 5 representan cuatro categorías de proyectos basadas en el nivel de ingeniería, que varían desde la mejor (categoría I) hasta la peor (categoría IV) [26].

- Categoría I: instalaciones diseñadas, construidas y operadas con ingeniería de vanguardia y cumpliendo con las normas y especificaciones técnicas vigentes
- Categoría II: instalaciones diseñadas, construidas y operadas utilizando prácticas de ingeniería estándar.
- Categoría III: instalaciones que no contaron con

- diseños y su construcción u operación es deficiente.
- Categoría IV: instalaciones con poca o ninguna ingeniería.

3. Resultados

3.1 Determinación del nivel de seguridad

Para determinar el nivel de seguridad de los taludes constituidos por arenas limosas y arcillosas con gravas y boleas de la Fm. San Diego (Tabla 1), se proponen los factores de seguridad de las Tablas 2 y 3. Dichos factores fueron calculados para las aceleraciones sísmicas establecidas en la norma técnica, así como para diferentes niveles de saturación del terreno.

Tabla 2. Factores de seguridad para diferentes aceleraciones sísmicas (a).

| Talud | Factor de seguridad mínimo (F.Smín) | | | | | | |
|-------|-------------------------------------|-------|--------------|------|-----------|----------|-----------|
| | | H (m) | α (°) | a=0 | a = 0.24g | a = 0.3g | a = 0.36g |
| 3.60 | 31 | 3.77 | 2.52 | 2.33 | 2.19 | 2.14 | |
| 4.90 | 35 | 2.42 | 2.06 | 1.93 | 1.83 | 1.80 | |
| 6.40 | 38 | 1.96 | 1.73 | 1.64 | 1.56 | 1.53 | |
| 8.10 | 42 | 1.63 | 1.46 | 1.38 | 1.32 | 1.30 | |
| 10.00 | 45 | 1.43 | 1.26 | 1.20 | 1.14 | 1.13 | |
| 12.10 | 48 | 1.20 | 1.10 | 1.05 | 1.01 | 1.00 | |
| 14.40 | 50 | 1.06 | 0.99 | 0.94 | 0.91 | | |
| 16.90 | 52 | 0.96 | | | | | |

- g es la aceleración de la gravedad.
- Los factores en letra cursiva corresponden a superficies de falla por debajo de la base del talud, el resto corresponde a superficies que intersectan el talud o pasan por el pie.
- Para las mismas pendientes (α) y alturas (H) superiores a las indicadas, los F.Smín se reducen aproximadamente un 3% por cada metro.

Tabla 3. Factores de seguridad para diferentes porcentos de saturación del terreno.

| Talud | Factor de seguridad mínimo (F.Smín) | | | | | | |
|-------|-------------------------------------|-------|--------------|------|------|------|--------|
| | | H (m) | α (°) | S=0 | S=25 | S=50 | S=0.75 |
| 3.60 | 31 | 3.77 | 2.86 | 2.60 | 2.44 | 2.35 | |
| 4.90 | 35 | 2.42 | 2.26 | 2.01 | 1.81 | 1.74 | |
| 6.40 | 38 | 1.96 | 1.84 | 1.61 | 1.42 | 1.36 | |
| 8.10 | 42 | 1.63 | 1.53 | 1.35 | 1.17 | 1.08 | |
| 10.00 | 45 | 1.43 | 1.39 | 1.11 | 0.94 | 0.86 | |
| 12.10 | 48 | 1.20 | 1.16 | 0.96 | 0.80 | | |
| 14.40 | 50 | 1.06 | 1.06 | 0.85 | | | |
| 16.90 | 52 | 0.96 | 0.94 | | | | |

- Los factores en letra cursiva corresponden a superficies de falla por debajo de la base del talud, el resto corresponde a superficies que intersectan el talud o pasan por el pie
- Para las mismas pendientes (α) y alturas (H) superiores a las indicadas, los F.Smín se reducen aproximadamente un 3% por cada metro.

Las Figuras 6(a) y 6(b) muestran los ábacos de comportamiento de los factores de seguridad mínimos para diferentes aceleraciones y niveles de saturación del terreno, respectivamente.

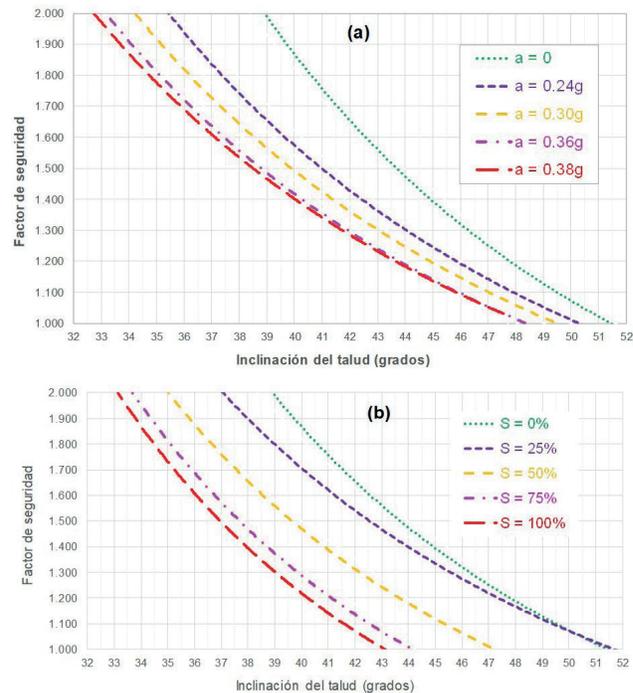


Figura 6. Factores de seguridad mínimos vs inclinación del talud. (a) Para diferentes aceleraciones sísmicas; (b) para diferentes saturaciones del terreno.

En la Tabla 4 se presentan las inclinaciones recomendadas para alcanzar niveles de seguridad aceptables, en taludes con alturas que no superen los 20m.

Tabla 4. Inclinaciones recomendadas para taludes de corte con H ≤ 20m en el terreno analizado.

| Inclinación recomendada para conseguir FSmín = 1.3, según la aceleración sísmica | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------|----------|
| a= 0.24g | a= 0.30g | a= 0.36 g | a= 0.38g |
| 44° | 43° | 42° | 42° |
| Inclinación recomendada para conseguir FSmín = 1.3, según la saturación del terreno | | | |
| S= 25% | S = 50% | S = 75% | S = 100% |
| 46° | 42° | 40° | 39° |

3.2 Estimación de la probabilidad de falla

Si el nivel de seguridad del talud no es aceptable porque el factor de seguridad es menor que el valor límite admisible establecido en la normativa, se recomienda estimar la probabilidad de ocurrencia del fallo.

3.2.1 Probabilidad temporal de ocurrencia. Se estimó utilizando los datos de fallas registradas en la unidad litológica descrita como arenas y conglomerados marinos y no marinos de la Fm. San Diego (Figura 3). En esta

unidad litológica han ocurrido 13 eventos en los últimos 21 años, por lo que el intervalo de recurrencia medio histórico (RI) es de 1.615 años y la probabilidad anual de falla es de aproximadamente 0.619. En la Figura 7 se muestra la probabilidad temporal de ocurrencia de fallas de taludes, para períodos de retorno mayores, obtenida mediante la ecuación (1).

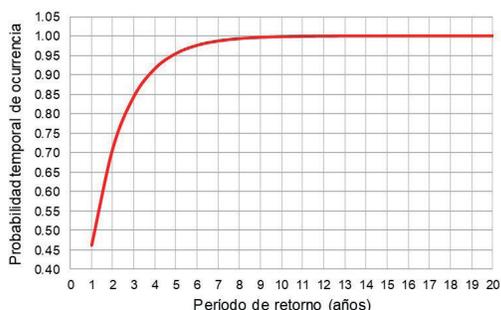


Figura 7. Probabilidad temporal de ocurrencia vs período de retorno.

Como se observa, la probabilidad de ocurrencia de fallas de taludes de corte en el área de estudio es muy alta (entre 0.46 y 1.00) para períodos de retorno menores que la vida útil de cualquier proyecto de ingeniería.

3.2.2 Probabilidad de falla vs factor de seguridad. Para utilizar la correlación entre la probabilidad anual de falla y el factor de seguridad explicada en la sección 2.3.2., se propone el siguiente procedimiento:

- Determinar la categoría de los proyectos e instalaciones donde se encuentran los taludes que serán objeto de análisis. En este punto se recomienda dar prioridad a los aspectos geotécnicos en las etapas de estudio, diseño y construcción no solo de los taludes, sino de las estructuras e infraestructuras de su entorno cercano.
- Determinar el factor de seguridad de los taludes, utilizando las Tablas 2 y 3, o las Figuras 6(a) y 6(b).
- Estimar la probabilidad anual de falla de los taludes a partir de los factores de seguridad y las categorías de los proyectos, utilizando la Figura 5.

3.3 Aplicación del procedimiento

Para comprobar la viabilidad y factibilidad del procedimiento, se analizaron tres taludes del área urbana en los que ocurrieron fallas entre diciembre de 2019 y julio de 2020 (Figura 8).



Figura 8. Ubicación de los taludes analizados en el mapa geológico de Tijuana.

A partir de los resultados de estudios realizados posteriores a las fallas, se obtuvieron datos sobre las estructuras e infraestructuras existentes en los sitios afectados, así como sobre las condiciones geométricas, geotécnicas, hidrológicas y sísmicas que tenían los taludes en el momento de las fallas. Con esta información, se aplicó el procedimiento propuesto y se determinaron: la categoría de los proyectos e instalaciones que se encuentran en los sitios donde se ubican los taludes fallados, así como los factores de seguridad y las probabilidades anuales de falla que tenían los mismos en el momento del colapso (Tabla 5).

Tabla 5. Resultados de la aplicación del procedimiento propuesto en los taludes analizados.

| Talud | Categoría de los proyectos | Inclin. | FS mín | Prob. anual de falla |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------|----------------------|
| 1 | III. Las estructuras e infraestructuras existentes en el sitio no contaron con diseños y los procesos constructivos no fueron controlados ni supervisados adecuadamente | 54° | 0.90 | 0.75 |
| 2 | | 56° | 0.80 | 1.00 |
| 3 | | 63° | 0.65 | 1.00 |

Los resultados validan el procedimiento propuesto porque indican que los taludes presentaban muy bajos niveles de seguridad y muy alta probabilidad de ocurrencia de fallas.

4. Discusión

El diseño y construcción de taludes de corte en terrenos con topografía irregular y condiciones geológicas y geotécnicas complejas, han sido tareas difíciles para los ingenieros a lo largo de la historia. Sin embargo, cuando estos escenarios se encuentran en zonas urbanas donde se combinan diversos factores naturales y antropogénicos y la ocurrencia de fallas puede afectar no solo gran cantidad de estructuras e infraestructuras, sino la vida de muchas personas; es imprescindible incluir el análisis y la evaluación del riesgo

en todas las etapas del proyecto, con especial énfasis en la toma de decisiones. La determinación correcta de los niveles de seguridad, la estimación de la probabilidad de falla y la toma de decisiones basada en riesgos, son el gran desafío que los ingenieros geotécnicos deben enfrentar para evitar, o al menos mitigar, el impacto negativo que las fallas de taludes producen cada año de manera directa e indirecta sobre bienes físicos, líneas vitales y personas, en muchas zonas urbanas de todo el mundo.

El procedimiento que se presenta en este trabajo se elaboró con el objetivo de proporcionar a los ingenieros una herramienta práctica y confiable, tanto para el diseño de taludes, como para la corrección de las fallas que puedan producirse en estas estructuras térreas. Dicho procedimiento, permite evaluar la estabilidad de taludes de corte en un sector del área urbana de Tijuana, a partir de la determinación del nivel de seguridad y la estimación de la probabilidad de ocurrencia de fallas. Se elaboró, utilizando datos e información geológica y geotécnica existente sobre el área de estudio, los registros históricos de fallas ocurridas, el juicio de expertos y la experiencia de los autores.

5. Conclusiones

En la ciudad de Tijuana, México, las complejas condiciones geomorfológicas, geológicas y geotécnicas, y las transformaciones del medio físico producidas por un crecimiento urbano rápido y no planificado, generan un escenario propicio para la inestabilidad de taludes. La aplicación del procedimiento en tres taludes donde se produjeron fallas recientemente, demostró su viabilidad, factibilidad y confiabilidad, pues se pudo comprobar que, en el momento de las fallas, los taludes presentaban muy bajos niveles de seguridad y, en consecuencia, una muy alta probabilidad de ocurrencia de fallas. Esto, es consistente con la cantidad y magnitud de las fallas ocurridas en el área de estudio en los últimos 20 años. Es importante señalar que los resultados y las recomendaciones que se presentan son válidas para taludes de corte en la unidad litológica constituida por areniscas y conglomerados marinos y no marinos de la Fm. San Diego. En trabajos posteriores se presentarán enfoques y procedimientos similares, aplicables en otras unidades litológicas existentes en el área urbana de Tijuana.

6. Agradecimientos

Este artículo es el resultado de la colaboración entre las empresas mexicanas Grupo ITEICO, GEOSERVICIOS y GEOCIM. Los autores desean agradecer especialmente a los ingenieros y técnicos de estas empresas, por el apoyo brindado en las fases de exploración geotécnica, análisis de laboratorio y compilación de datos e información que fueron utilizados en la investigación y realización del trabajo.

7. Referencias

- [1] N. R. Morgenstern, "Toward landslide risk assessment in practice", In Proc., International Workshop on landslide risk assessment, 15 – 23. Honolulu, Hawaii, USA, 1997.
- [2] O. A. Cuanalo, A. O. Oliva, R. J. Gallardo, "Inestabilidad de laderas. Influencia de la actividad humana", *Revista Elementos*, vol. 84, pp. 39 – 46. BUAP, México, 2011.
- [3] R. Chowdhury, and P. Flentje, "Practical reliability approach to urban slope stability", In Proc., 11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, ETH Zurich, Switzerland, 2011.
- [4] S. Wright, F. Kulhawy, and J. Duncan, "Accuracy of Equilibrium Slope Stability Analysis", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, vol. 99 (10), pp.783 – 791, 1973. Doi: <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001933>
- [5] J. Lowe, "Stability Analysis of Embankments", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*. Vol. 93 (4). pp1 – 33, 1976. Doi: <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000984>
- [6] J. M. Duncan, "State of the Art: Limit Equilibrium and Finite-Element Analysis of Slopes", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122 (7), pp. 577 – 596, 1996. Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:7\(577\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:7(577))
- [7] J. Suárez, "Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales", *Editorial UIS*, Colombia, 1998.
- [8] E. Juárez, y A. Rico, "Mecánica de suelos", Vol. 1 y 2, Editorial Limusa, México, 2003.
- [9] O. A. Cuanalo, "Metodología para la selección de procesos constructivos empleados en estabilizar deslizamientos de laderas", Tesis Doctoral, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara, Cuba, 2004.
- [10] A. O. Oliva, "Análisis de la estabilidad y seguridad de taludes", Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo, España, 1999.
- [11] T. W. Lambe, and F. Silva, "Evaluating the stability of an earth structure", In Proc., 12th Pan-American Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2785–2790. Cambridge, Mass, Verlag Gluckauf GmbH, Essen, 2003.
- [12] J. M. Duncan, and S. G. Wright, "Soil strength and slope stability", Hoboken, Wiley, N.J., U.S.A., 2005.
- [13] A.O. Oliva-González, D. Mascareño Jiménez, R.J. Gallardo-Amaya, M.A. Berumen-Rodríguez, "Urban growth and landslide risk in Tijuana, Mexico", *Academia Letters*, Article 3386, (2021). Doi: <https://doi.org/10.20935/AL3386>

- [14] A. O. Oliva-González, J. Zambrano-García, M. A., Berumen-Rodríguez and R. J. Gallardo-Amaya, “Análisis y evaluación del riesgo por inestabilidad del terreno en proyectos de urbanización. Un estudio de caso en Tijuana, México”, *Respuestas*, 25(3), 234–249, 2020. Doi: <https://doi.org/10.22463/0122820X.2455>
- [15] A. O. Oliva, M. A. Berumen, R. J. Gallardo, and H. Y. Jaramillo, “Terrain instability in the Tijuana metropolitan area: Analysis of a failure in the access road to an industrial park”, *Engineering Failure Analysis*, 104, pp. 354–370, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.05.040>
- [16] L. A. Delgado-Argote, M. A. Pérez-Flores, F. Herrera-Barrientos, O. Sarychikhina, M. Contreras-López, L. Ochoa-Tinajero, and T. A. Avilés-Esquivel, “Interpretación geológica y geoelectrica de un deslizamiento rotacional relacionado con paleodrenaje en el fraccionamiento Valle del Sur, en Tijuana, Baja California”, *Rev. GEOS*, vol. 37 (2), 1 – 17. México, 2017.
- [17] J. A. Minch, “Stratigraphy and structure of the Tijuana-Rosarito Beach area, northwestern Baja California, Mexico”, *Geological Society of America Bulletin*, vol. 78 (9), 1155–1178, 1967. Doi: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1967\)78\[1155:SASOTT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1967)78[1155:SASOTT]2.0.CO;2)
- [18] R. G. Gastil, R. P. Phillips, and E. C. Allison, “Reconnaissance geology of the state of Baja California”, *Geological Society of America Memoir*, 140, 1975. Doi: <https://doi.org/10.1130/MEM140>
- [19] L. A. Delgado-Argote, J. C. Hurtado, P. Avilés, y G. Gómez, “Factores geológicos y antrópicos de riesgo en Tijuana, Baja California: el caso del fraccionamiento jardines de agua caliente”, *Revista GEOS*, vol. 32 (2), pp. 342 – 366, 2012.
- [20] L. A. Delgado-Argote, A. Hinojosa, M. Aragón, G. Chávez, R. Mendoza, V. Frías, “Estudio de riesgo geológico en Tijuana con base en análisis geomorfológicos estructurales y la respuesta del terreno en las áreas el Pasteje, el Pato y Cañada Verde”, Reporte Técnico 29p. Departamento de Geología, División de Ciencias de la Tierra, CICESE, México, 1993.
- [21] M. R. Legg, V. O. Wong, F. Suárez, “Geologic Structure and Tectonic of the Inner Continental Borderland of northern Baja California”, In: Dauphin P. J., Simoneit B. R. T., Editors, *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 47. Chapter 9, 145–77, 1991. Doi: <https://doi.org/10.1306/M47542C9>
- [22] D. M. Criado-Rodríguez, W. A. Pacheco-Vergel, y N. Afanador-García, “Vulnerabilidad sísmica de centros poblados: estudio de caso”, *Rev. Ingenio*, vol. 17, n.º 1, pp. 43–48, ene. 2020. Doi: <https://doi.org/10.22463/2011642X.2441>.
- [23] A. O. Oliva-González y R. Fort-Villavicencio, “Metodología para la predicción de las vibraciones del terreno inducidas por voladuras y sus efectos en las estructuras. Aplicación en un caso real”, *Rev. Ingenio*, vol. 16, n.º 1, pp. 1–9, ene. 2019. Doi: <https://doi.org/10.22463/2011642X.2381>.
- [24] NTC (Normas Técnicas Complementarias), “Seguridad estructural en materia de diseño sísmico”, SIDURT, Estado de Baja California, México, 2017.
- [25] R. A. Crovelli, “Probability models for estimation of number and costs of landslides”, United States Geological Survey Open File Report, pp. 00 – 249, 2000. Doi: <https://doi.org/10.3133/ofr00249>
- [26] F. Silva, T. William and W. Allen, “Probability and Risk of Slope Failure”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 134 (12), 2008. Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:12\(1691\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:12(1691))