Cálculo de la Probabilidad de Falla
Fuente de Amenaza No. 1

La figura No. 1 presenta el modelo geotécnico evaluado para calcular la probabilidad de falla por el método de falla circular de Janbu; los datos introducidos en el PCStable se presentan en el capítulo No. 8, correspondiente a evaluación de la Amenaza. Los resultados arrojados por el programa, en términos de Factores de Seguridad para cada combinacvión de parámetros de resistencia se presentan en la tabla No. 1, en la cual se muestran además las probabilidades de falla para cada condición de análisis, y la proyección de la mayor de éstas a 20 años, la cual determina el nivel de Amenaza del procesos activo.

Análisis: Falla Rotacional de Janbu						
Sin sismo ni lluvia						
FS	C	ϕ	FS	PF lognor	PF normal	PF Weibull
FS++	10	30	2.157	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	1.515	0.0454	0.064	0.0025
FS-+	0	30	1.667	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	1.052	0.044	0.0622	0.0024
Con lluvia y sin sismo						
FS++	10	30	1.991	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	1.41	0.089	0.1017	0.019
FS-+	0	30	1.51	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	0.955	0.00357	0.00406	0.00078
Con sismo y sin lluvia						
FS++	10	30	1.195	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	0.844	0.7292	0.7094	0.6758
FS-+	0	30	0.905	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	0.57	0.001474	0.001424	0.001366
Con lluvia y sismo						
FS++	10	30	1.099	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	0.784	0.8255	0.8276	0.7664
FS-+	0	30	0.818	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	0.516	$6.95x10^{-5}$	$6.97x10^{-5}$	$6.45x10^{-5}$
$(Pf)_{anual}$				0.049	**0.067**	0.00455
Período para alcanzar Pf alta				**15 años**		
$(Pf)_{20}$				**0.738**		
Clasificación				**Alta**		

Tabla No. 1: Resultados del Análisis para Falla Rotacional de Janbu. Fuente de Amenaza No. 1

En la misma figura se presenta la superficie de falla especificada (línea punteada), que corresponde al contacto entre el depósito y el macizo rocoso; se asume que el talud falla a lo largo de esta superficie, y se emplea el método de superficie especificada de Janbu. Los resultados del análisis en términos de Factores de Seguridad y las porobabilidades de falla calculadas para cada una de las condiciones de análisis se presentan en la tabla No. 2.

Análisis: Superficie Especificada de Janbu						
Sin sismo ni lluvia						
FS	C	ϕ	FS	PF lognor	PF normal	PF Weibull
FS++	10	30	3.017	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	2.064	$2.3x10^{-4}$	0.00588	$2.63x10^{-22}$
FS-+	0	30	2.586	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	1.631	$2.22x10^{-4}$	0.0056	$2.57x10^{-22}$
Con lluvia y sin sismo						
FS++	10	30	1.811	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	1.282	0.125	0.127	0.0426
FS-+	0	30	1.456	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	0.918	0.0049	0.0051	0.0017
Con sismo y sin lluvia						
FS++	10	30	1.484	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	1.017	0.3197	0.2870	0.2515
FS-+	0	30	1.272	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	0.802	0.000646	0.00058	0.00051
Con lluvia y sismo						
FS++	10	30	0.921	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	0.65	0.8255	0.8276	0.7664
FS-+	0	30	0.744	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	0.47	$6.95x10^{-5}$	$6.97x10^{-5}$	$6.45x10^{-5}$
$(Pf)_{anual}$				0.0058	**0.011**	0.0021
$(Pf)_{20}$				**0.197**		
Clasificación				**Baja**		

Tabla No. 2: Resultados del Análisis para Superficie Especificada de Janbu. Fuente de Amenaza No. 1

Dado que para asignar un nivel de Amenaza al proceso activo es necesario escoger el valor de probabilidad de falla más alto que se determine en los análisis, en este caso se encuentra que el análisis de estabilidad por falla circular es el que proporciona el valor más alto (Pf = 0.738) en el período de diseño (20 años). El nivel de Amenaza se clasifica como Alto.

Cálculo de la Probabilidad de Falla
Fuente de Amenaza No. 2

La figura No. 2 presenta el modelo geotécnico empleado en el análisis de estabilidad de la fuente de amenaza No. 2; en este caso se ha supuesto que, dadas las condiciones actuales, los bloques expuestos drenan rápidamente el agua en caso de una aguacero fuerte en la zona, de tal manera que la condición de análisis Sin lluvia ni sismo genera los mismos factores de seguridad que la condición Con lluvia y sin sismo. Por la miosma razón, se asume que los factores de segurida proporcionados por la condición de Sismo sin lluvia son los mismos generados por la condición de Sismo y lluvia. La figura no. 2 se acompaña de una memoria de cálculo que explica la forma en que se determinaron la condiciones de estabilidad para cada una de las solicitaciones consideradas; los resultados en términos de factores de seguridad y las probabilidades de falla que de ellos resultan se presentan en la tabla No. 3.

Análisis: Equilibrio Límite de Bloques						
Sin sismo ni lluvia						
FS	C	ϕ	FS	PF lognor	PF normal	PF Weibull
FS++	20	32	1.21	**Condición de Análisis**		
FS+-	20	25	0.96	0.4976	0.4670	0.7654
FS-+	0	32	1.08	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	25	0.80	0.477	0.447	0.4460
Con lluvia y sin sismo						
FS++	20	32	1.21	**Condición de Análisis**		
FS+-	20	25	0.96	0.498	0.4670	0.4653
FS-+	0	32	1.08	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	25	0.80	0.019	0.018	0.01860
Con sismo y sin lluvia						
FS++	20	32	1.09	**Condición de Análisis**		
FS+-	20	25	0.846	0.7613	0.7505	0.724
FS-+	0	32	0.97	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	25	0.73	0.00154	0.00152	0.0014
Con lluvia y sismo						
FS++	20	32	1.09	**Condición de Análisis**		
FS+-	20	25	0.846	0.7613	0.7505	0.724
FS-+	0	32	0.97	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	25	0.73	6.4×10^{-5}	6.32×10^{-5}	6.1×10^{-5}
$(Pf)_{anual}$				**0.498**	0.467	0.466
Período para alcanzar Pf Alta				**2 años**		
$(Pf)_{20}$				**0.999**		
Clasificación				**Muy Alta**		

Tabla No. 3: Resultados del Análisis para Equilibrio Límite de Bloques. Fuente de Amenaza No. 2

Cálculo de la Probabilidad de Falla
Fuente de Amenaza No. 3

La figura No. 3.1 presenta el perfil del modelo geotécnico empleado en la evaluación de estabilidad de la parte baja de la fuente de Amenaza No. 3, por el método de superficie especificada de Janbu (línea punteada); en este caso, se selecciona el mínimo Factor de Seguridad hallado para cada una de las combinaciones de los parámetros de resistencia asumidos; de esta forma, los resultados arrojados por el programa PCStable y las probabilidades de falla para cada una de las condiciones de análisis consideradas se presenta en la tabla No. 4.

Análisis: Superficie Especificada de Janbu						
Sin sismo ni lluvia						
FS	C	ϕ	FS	PF lognor	PF normal	PF Weibull
FS++	10	30	2.045	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	1.3	0.031	0.05347	0.0095
FS-+	0	30	1.854	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	1.17	0.0296	0.05122	0.00091
Con lluvia y sin sismo						
FS++	10	30	1.714	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	1.152	0.1231	0.1286	0.0452
FS-+	0	30	1.524	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	0.961	0.0049	0.0051	0.0018
Con sismo y sin lluvia						
FS++	10	30	1.116	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	0.744	0.7536	0.7348	0.7023
FS-+	0	30	1.007	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	0.635	0.00153	0.00148	0.001419
Con lluvia y sismo						
FS++	10	30	0.921	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	0.621	0.942	0.9622	0.833
FS-+	0	30	0.812	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	0.512	$6.4x10^{-5}$	$6.4x10^{-5}$	$6.4x10^{-5}$
$(Pf)_{anual}$				0.036	**0.058**	0.0026
Período para alcanzar Pf alta				**17 años**		
$(Pf)_{20}$				**0.68**		
Clasificación				**Alta**		

Tabla No. 4: Resultados del Análisis para Superficie Especificada de Janbu. Fuente de Amenaza No. 3

La misma figura No. 3.1 muestra el análisis de estabilidad de la fuente de amenaza para falla rotacional por el método de falla circular de Janbu, teniendo en cuenta que la pérdida del material de la pata del deslizamiento puede provocar la extensión del problema de

inestabilidad hacia la parte alta del mismo, es decir, presentando un comportamiento retrogresivo. Los resultados de esta evaluación se presentan a continuación.

Análisis: Falla Rotacional de Janbu						
Sin sismo ni lluvia						
FS	C	ϕ	FS	PF lognor	PF normal	PF Weibull
FS++	10	30	1.572	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	1.102	0.2771	0.2484	0.1992
FS-+	0	30	1.276	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	0.805	0.2655	0.2380	0.1910
Con lluvia y sin sismo						
FS++	10	30	1.371	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	0.976	0.5126	0.4625	0.4620
FS-+	0	30	1.073	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	0.677	0.0205	0.0185	0.01844
Con sismo y sin lluvia						
FS++	10	30	0.978	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	0.689	0.9137	0.9356	0.8540
FS-+	0	30	0.781	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	0.494	0.00185	0.00189	0.00173
Con lluvia y sismo						
FS++	10	30	0.836	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	0.587	0.9736	0.9936	0.9809
FS-+	0	30	0.638	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	0.403	8.2×10^{-5}	8.37×10^{-5}	7.8×10^{-5}
$(Pf)_{anual}$				**0.2873**	0.2584	0.2111
Período para alcanzar Pf alta				**3.5 años**		
$(Pf)_{20}$				**0.999**		
Clasificación				**Muy Alta**		

Tabla No. 5: Resultados del Análisis para Falla Rotacional de Janbu. Parte Baja Fuente de Amenaza No. 3

Dado que se trata de analizar un fenómeno de tipo retrogresivo, se evaluaron las condiciones de estabilidad de la parte media-alta de la ladera, emplendo el método de falla circular de Janbu al modelo que se presenta en la figura no. 3.3; los Factores de Seguridad arrojados por el programa PCStable, así como las probabilidades de falla calculadas para cada una de las condiciones consideradas se presentan en la tabla No. 6.

Análisis: Falla Rotacional de Janbu						
Sin sismo ni lluvia						
FS	C	ϕ	FS	PF lognor	PF normal	PF Weibull

FS++	10	30	1.242	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	0.859	0.6317	0.5930	0.5868
FS-+	0	30	1.043	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	0.658	0.6051	0.5682	0.5622
Con lluvia y sin sismo						
FS++	10	30	1.031	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	0.729	0.8747	0.8900	0.8161
FS-+	0	30	0.822	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	0.519	0.035	0.036	0.033
Con sismo y sin lluvia						
FS++	10	30	0.803	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	0.588	0.9852	0.9973	0.9440
FS-+	0	30	0.655	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	0.42	0.0020	0.00202	0.002
Con lluvia y sismo						
FS++	10	30	0.631	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	0.454	0.999	0.999	0.9796
FS-+	0	30	0.488	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	0.308	$8.41x10^{-5}$	$8.42x10^{-5}$	$8.25x10^{-5}$
$(Pf)_{anual}$				**0.642**	0.61	0.597
Período para alcanzar Pf alta				**2 años**		
$(Pf)_{20}$				**0.999**		
Clasificación				**Muy Alta**		

Tabla No. 6 Resultados del Análisis Falla Rotacional de Janbu. Parte Media-Alta Fuente de Amenaza No. 3

Como puede observarse, para el caso de la falla circular, la probabilidad de falla es Muy Alta tanto para el caso de la falla en la parte baja del deslizamiento como para la parte media-alta.

Cálculo de la Probabilidad de Falla
Fuente de Amenaza No. 4

La figura no. 4 presenta el modelo geotécnico empleado en la determinación de la probabilidad de falla de la fuente de Amenaza No. 4; en este caso se consideró la posibilidad

de falla a lo largo de una superficie especificada que en este caso corresponde al contacto entre el macizo rocoso (línea punteada de la figura) y el deslizamiento, y la posibilidad de falla circular. La evaluación de estabilidad mediante el método de la superficie especificada de Janbu arrojó los resultados mostrados en la tabla no. 7, que también incluye las probabilidades de falla para cada una de las condiciones consideradas.

Análisis: Superficie Especificada de Janbu						
Sin sismo ni lluvia						
FS	C	ϕ	FS	PF lognor	PF normal	PF Weibull
FS++	10	30	1.734	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	1.224	0.1736	0.1645	0.0856
FS-+	0	30	1.387	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	0.874	0.1663	0.1576	0.0820
Con lluvia y sin sismo						
FS++	10	30	1.635	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	1.161	0.2452	0.2207	0.1608
FS-+	0	30	1.289	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	0.813	0.00979	0.009	0.0064
Con sismo y sin lluvia						
FS++	10	30	1.05	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	0.746	0.8599	0.8717	0.8020
FS-+	0	30	0.825	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	0.521	0.00174	0.00176	0.00162
Con lluvia y sismo						
FS++	10	30	0.986	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	0.706	0.9076	0.9306	0.849
FS-+	0	30	0.763	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	0.481	$7.64x10^{-5}$	$7.83x10^{-5}$	$7.14x10^{-5}$
$(Pf)_{anual}$				**0.1778**	0.1684	0.0888
Período para alcanzar Pf alta				**6 años**		
$(Pf)_{20}$				**0.97**		
Clasificación				**Muy Alta**		

Tabla No. 7: Resultados del Análisis para Superficie Especificada de Janbu. Fuente de Amenaza No. 4

Los resultados de los análisis de probabilidad y de estabilidad para falla circular de Janbu se presentan en la tabla No. 8.

Análisis: Falla Rotacional de Janbu						
Sin sismo ni lluvia						
FS	C	ϕ	FS	PF lognor	PF normal	PF Weibull
FS++	10	30	1.823	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	1.365	0.2640	0.2284	0.1702

FS-+	0	30	1.196	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	0.754	0.2529	0.2188	0.1630
Con lluvia y sin sismo						
FS++	10	30	1.808	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	1.356	0.2857	0.2459	0.195
FS-+	0	30	1.164	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	0.734	0.0114	0.00981	0.00778
Con sismo y sin lluvia						
FS++	10	30	1.121	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	0.85	0.8152	0.8156	0.7503
FS-+	0	30	0.714	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	0.45	0.00165	0.00165	0.00152
Con lluvia y sismo						
FS++	10	30	1.11	**Condición de Análisis**		
FS+-	10	20	0.843	0.8232	0.8267	0.7569
FS-+	0	30	0.691	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	20	0.435	$6.93x10^{-5}$	$6.96x10^{-5}$	$6.37x10^{-5}$
$(Pf)_{anual}$				**0.266**	0.2303	0.1723
Período para alcanzar Pf alta				**4 años**		
$(Pf)_{20}$				**0.995**		
Clasificación				**Muy Alta**		

Tabla No. 8: Resultados del Análisis para Falla Rotacional de Janbu. Fuente de Amenaza No. 4

Se encuentra que para ambos métodos de evaluación de condiciones de estabilidad, la probabilidad de falla registra niveles muy altos en el período de diseño (20 años); la fuente de Amenaza presenta una categoría Muy Alta.

Cálculo de la Probabilidad de Falla
Fuente de Amenaza No. 5

La figura No. 5 presenta el modelo geotécnico empleado en la evaluación de estabilidad de la parte deslizada de la fuente de Amenaza No. 5; en este caso se empleó el método de superficie especificada de Janbu, toda vez que se ha identificado el mecanismo de falla planar como el mecanismo de inestabilidad de la zona.

Análisis: Superficie Especificada de Janbu						
Sin sismo ni lluvia						
FS	C	ϕ	FS	PF lognor	PF normal	PF Weibull
FS++	14	25	1.33	**Condición de Análisis**		
FS+-	14	15	0.894	0.5916	0.5407	0.5387
FS-+	0	25	1.06	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	15	0.609	0.5670	0.518	0.516
Con lluvia y sin sismo						
FS++	14	25	1.176	**Condición de Análisis**		
FS+-	14	15	0.801	0.7474	0.7238	0.6919
FS-+	0	25	0.921	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	15	0.529	0.0298	0.02907	0.02762
Con sismo y sin lluvia						
FS++	14	25	0.762	**Condición de Análisis**		
FS+-	14	15	0.507	0.9859	0.9984	0.9422
FS-+	0	25	0.615	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	15	0.354	0.00199	0.00202	0.0019
Con lluvia y sismo						
FS++	14	25	0.669	**Condición de Análisis**		
FS+-	14	15	0.451	0.9957	0.999	0.9655
FS-+	0	25	0.527	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	15	0.303	$8.38x10^{-5}$	$8.42x10^{-5}$	$8.13x10^{-5}$
$(Pf)_{anual}$				**0.5988**	0.55	0.546
Período para alcanzar Pf alta				**2 años**		
$(Pf)_{20}$				**0.999**		
Clasificación				**Muy Alta**		

Tabla No. 9: Resultados del Análisis para Superficie Especificada de Janbu. Parte Deslizada de la Fuente de Amenaza No. 5

La parte superior al deslizamiento debió analizarse para la condición de falla de los materiales movidos; los resultados arrojados por el programa PCStable par esta condición y las probabilidades de falla que resultan de ellos se presentan en la tabla No. 10; el análisis de estabilidad se llevó a cabo mediante el método de superficie irregular de Janbu, y el modelo geotécnico se presenta en la figura No. 5.1.

Análisis: Superficie Irregular de Janbu						
Sin sismo ni lluvia						
FS	C	ϕ	FS	PF lognor	PF normal	PF Weibull
FS++	14	25	0.915	**Condición de Análisis**		
FS+-	14	15	0.604	0.9411	0.969	0.8794
FS-+	0	25	0.704	**Probabilidad Condicional**		

FS--	0	15	0.405	0.9016	0.9283	0.8424
Con lluvia y sin sismo						
FS++	14	25	0.859	**Condición de Análisis**		
FS+-	14	15	0.572	0.9617	0.9862	0.9056
FS-+	0	25	0.68	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	15	0.391	0.0384	0.0394	0.03620
Con sismo y sin lluvia						
FS++	14	25	0.587	**Condición de Análisis**		
FS+-	14	15	0.393	0.9988	0.9999	0.9785
FS-+	0	25	0.444	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	15	0.257	0.00202	0.0020	0.0020
Con lluvia y sismo						
FS++	14	25	0.546	**Condición de Análisis**		
FS+-	14	15	0.369	0.9995	0.9999	0.9844
FS-+	0	25	0.418	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	15	0.242	$8.41x10^{-5}$	$8.42x10^{-5}$	$8.29x10^{-5}$
$(Pf)_{anual}$				0.941	**0.9697**	0.88
Período para alcanzar Pf alta				**1 años**		
$(Pf)_{20}$				**0.999**		
Clasificación				**Muy Alta**		

Tabla No. 10: Resultados del Análisis para Superficie Irregular de Janbu. Parte Alta Fuente de Amenaza No. 5

Los resultados del análisis indican que los niveles de Amenaza de esta fuente son muy altos aún en la actualidad, lo cual se evidencia en la probabilidad defalla calculada para unp período de 1 años, la cual es muy cercana a la obtenido para el período de diseño de 20 años.

Se encuentra, entonces, que la categoría de la Amenaza es Muy Alta.

Cálculo de la Probabilidad de Falla
Fuente de Amenaza No. 7

La figura no. 7 presenta el modelo geotécnico empleado en la evaluación de estabilidad de la fuente de Amenaza No. 7; en estecaso, se consideró la resistencia a la tracción que exhibe el material en función de la cohesión y del ángulo de fricción, procedentes de los ensayos de laboratorio efectuados por la firma NATIVA Ltda para el análisis de estabilidad

del barrio San Rafael; la correlación entre la resistencia a la tracción y el ángulo de fricción y la cohesión se presenta en el capítulo No. 8 del presente informe.

La figura No. 7 se acompaña de una memoria de análisis del problema; los resultados del análisis, en términos del Factor de Seguridad y las probabilidades de falla que resulktan de ellos se presentan en la tabla No. 11; se ha supuesto que el efeto de la lluvia sobre la estabilidad de la fuente de Amenaza es inocuo.

Análisis: Equilibrio de Bloque							
Sin sismo ni lluvia							
FS	C	ϕ	T	FS	PF lognor	PF normal	PF Weibull
FS++	20	25	2.55	2.8	**Condición de Análisis**		
FS+-	20	15	3.07	3.37	0.268	0.214	0.121
FS-+	5	25	0.64	0.704	**Probabilidad Condicional**		
FS--	5	15	0.77	0.874	0.257	0.205	0.116
Con lluvia y sin sismo							
FS++	20	25	2.55	2.26	**Condición de Análisis**		
FS+-	20	15	3.05	2.72	0.256	0.205	0.115
FS-+	0	25	0.64	0.57	**Probabilidad Condicional**		
FS--	0	15	0.77	0.684	$2.15x10^{-5}$	$1.72x10^{-5}$	$1x10^{-5}$
$(Pf)_{anual}$					**0.258**	0.206	0.116
$(Pf)_{20}$				**0.994**			
Clasificación				**Muy Alta**			

Tabla No. 11: Resultados del Análisis para Equilibro de Bloques. Fuente de Amenaza No. 7

Este análisis se basa en la suposición de que las ecuaciones de Morh-Coulomb son válidas en roca, y se ignora el efecto de puente en roca, el cual tiende a incrementar el valor de la cohesión del material rocoso en las discontinuidades.

Cálculo de la Probabilidad de Falla
Fuente de Amenaza No. 8

La figura No. 8 presenta el modelo geotécnico empleado en la evaluación de esta fuente de amenaza. De acuerdo a los resultados del levantamiento geológico, se estima que la dinámica de un movimineto en masa de esta parte de la ladera está limitada por la presencia de una falla geológica que atravieza el macizo en sentido norte-sur; dada la posición de ésta con respecto a las viviendas que podría afectar un movimiento en masa, se considera que el riesgo

sobre las edificaciones es bajo a medio. Para confirmar esto, se efectuó la evaluación de la probabilidad de falla de la ladera, empleando el método de superficie irregular de Janbu, el cual arrojó los resultados que se presentan en la tabla No. 12, en la que además se muestran las probabilidades de falla que resultan de los Factores de Seguridad hallados.

Análisis: Superficie Irregular de Janbu						
Sin sismo ni lluvia						
FS	C	ϕ	FS	PF lognor	PF normal	PF Weibull
FS++	21	25	2.416	**Condición de Análisis**		
FS+-	21	15	1.821	0.031	0.057	0.00084
FS-+	7	25	1.602	**Probabilidad Condicional**		
FS--	7	15	1.12	0.030	0.054	0.0008
Con lluvia y sin sismo						
FS++	21	25	2.309	**Condición de Análisis**		
FS+-	21	15	1.76	0.064	0.087	0.0086
FS-+	7	25	1.437	**Probabilidad Condicional**		
FS--	7	15	1.027	0.0025	0.0035	0.0035
Con sismo y sin lluvia						
FS++	21	25	1.385	**Condición de Análisis**		
FS+-	21	15	1.056	0.5364	0.4831	0.4832
FS-+	7	25	0.945	**Probabilidad Condicional**		
FS--	7	15	0.65	0.0011	0.00098	0.00098
Con lluvia y sismo						
FS++	21	25	1.321	**Condición de Análisis**		
FS+-	21	15	1.109	0.5986	0.5461	0.5434
FS-+	7	25	0.837	**Probabilidad Condicional**		
FS--	7	15	0.608	5.04×10^{-5}	4.6×10^{-5}	4.6×10^{-5}
$(Pf)_{anual}$				0.0336	**0.0585**	0.000213
$(Pf)_{20}$				**0.69**		
Clasificación				**Alta**		

Tabla No. 12: Resultados del Análisis para Superficie Irregular de Janbu. Fuente de Amenaza No. 8

Los resultados obtenidos muestran que en el período de diseño de 20 años los niveles de Amenaza son altos, a pesar de que la probabilidad de falla en la actualidad sea apenas de un 5.85%. El nivel de Amenaza se clasifica como Alto.

Cálculo de la Probabilidad de Falla
Fuente de Amenaza No. 9

Finalmente, y con el propósito de establecer un nivel de amenaza de los sectores que no presentan procesos activos, se decidió evaluar la probabilidad de falla para un perfil típico de la cantera sur. La evluación de estabilidad se llevó a cabo empleando el método de superficie irregular de Janbu, cuyos resultados en términos de Factores de Seguridad se presentan e la tabla No. 13, en la que además se incluyen las probabilidades de falla que resultan de dicho factores. El modelo geotécnico se presenta en la fugura No. 9 anexa.

Análisis: Superficie Irregular de Janbu						
Sin sismo ni lluvia						
FS	C	ϕ	FS	PF lognor	PF normal	PF Weibull
FS++	20	30	1.841	**Condición de Análisis**		
FS+-	20	20	1.377	0.0365	0.0545	0.00165
FS-+	10	30	1.47	**Probabilidad Condicional**		
FS--	10	20	1.065	0.035	0.0521	0.0016
Con lluvia y sin sismo						
FS	C	ϕ	FS	PF lognor	PF normal	PF Weibull
FS++	20	30	1.837	**Condición de Análisis**		
FS+-	20	20	1.375	0.0365	0.05447	0.001643
FS-+	10	30	1.469	**Probabilidad Condicional**		
FS--	10	20	1.065	0.00145	0.00217	$6.58x10^{-5}$
Con sismo y sin lluvia						
FS	C	ϕ	FS	PF lognor	PF normal	PF Weibull
FS++	20	30	1.132	**Condición de Análisis**		
FS+-	20	20	0.857	0.7572	0.743	0.7127
FS-+	10	30	0.916	**Probabilidad Condicional**		
FS--	10	20	0.664	0.00153	0.0015	0.00145
Con lluvia y sismo						
FS	C	ϕ	FS	PF lognor	PF normal	PF Weibull
FS++	20	30	1.13	**Condición de Análisis**		
FS+-	20	20	0.855	0.7580	0.7435	0.7133
FS-+	10	30	0.916	**Probabilidad Condicional**		
FS--	10	20	0.663	$6.38x10^{-5}$	$6.3x10^{-5}$	$6.0x10^{-5}$
$(Pf)_{anual}$				0.03798	**0.0558**	0.0031
$(Pf)_{20}$				**0.67**		
Clasificación				**Alta**		

Tabla No. 13: Resultados del Análisis para Superficie Irregular de Janbu. Fuente de Amenaza No. 9

Se encuentra que el nivel de Amenaza es en general alto, para un período de diseño de 20 años, en las zonas que no presentan procesos activos, pero que han sido objeto de procesos denudativos.

Las probabilidades de falla y los niveles de amenaza que estos representan se ilustrarn a continuación; el plano de Zonificación por Amenaza (Plano No. 6) presenta los niveles de amenaza hallados para cada una de las zonas estudiadas.

Fuente de Amenaza No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pf	0.067	0.51	0.111	0.271	0.478*	Conc.	0.503	0.057	0.056

Nivel de Amenaza	Baja	Alta	Baja	Baja	Media*	Media	Alta	M. Baja	M.Baja

Tabla No. 27: Resumen de Probabilidades de Falla y Niveles de Amenaza para la Zona de Estudio

*El nivel determinado para la Fuente de Amenaza No. 5 involucra toda la ladera; la parte deslizada presenta un nivel de **Amenaza Alto (Pf=0.541)**, lo cual se muestra en el plano de Zonificación por Amenaza (plano No. 6).

Evaluación de Estabilidad de la Fuente de Amenaza No. 2

Volcamiento de Bloques

La figura no. 2 presenta el modelo empleado en la determinación de la condiciones de estabilidad de los bloques involucrados en el proceso activo. En este caso, se hacen las siguientes suposiciones:

- Para que se genere el volcamiento de los bloques 1 y 2, es necesario que se produzca un deslizamiento del bloque inferior 3.
- La cohesión puede ser nula.
- La fuerza sísmica se aplicará en sentido horizontal a todos los bloques.

El tamaño de bloques en el sitio es aproximadamente de 2x2x1 mts.

Los valores de parámetros de resistencia empleados en el análisis son:

- c´: varía de 0 a 1.0 t/m^2
- ϕ': varía de 25^0 a 32^0.

El peso unitario del material rocoso es de $\gamma = 2.54\ t/m^3$.

Según lo mostrado en la figura, se tiene que:

$$\mathbf{P_1 = P_2 = Wn \times sen\ 30^0}$$

donde Wn es el peso del bloque (Ton).

Para pequeños movimientos, es posible asumir que se aplican las fuerzas P_1 y P_2 sobre el bloque No. 3:

$$\mathbf{Wn = 2.54 \times 2.0 \times 2.0 \times 1.0 = 10.16\ T}$$

$$\mathbf{P_1 = P_2 = P_3 = 10.16 \times sen\ (30^0) = 5.10\ T}$$

Así, considerando fricción para todos los bloques, y cohesión sólo para el bloque no. 3:

- **Fuerzas Estáticas Actuantes sobre el bloque No. 3**

$$\mathbf{Ta = P_1 + P_2 + P_3 = 15.30\ T}$$

  donde Ta es el total de las fuerzas estáticas actuantes.

- **Fuerzas Resistentes**

Fuerzas de Cohesión: Fc = c´x A = 1.0 x (2.0 x 1.0) = 2.0 T
Ángulo de Fricción: Wn x cos 30 x (tan 32^0) = 5.5 T
Wn x cos 30 x (tan 25^0) = 4.2 T

- **Cargas de Sismo Actuantes**

Se ha determinado que la aceleración sísmica de análisis es de a = 0.24g, y en consecuencia, se tiene que:

$$\mathbf{a = 0.24\ g = 2.35\ m/seg^2}$$

Así, la carga sísmica sobre el grupo de bloques es:

$$\mathbf{Fs = m \times a = 3 \times 2540 \times 2.35 \times \cos 30^0 / 9.8 = 1600\ kg = 1.6\ Ton}$$

Esta carga se aplica en sentido horizontal.

Finalmente, los factores de seguridad serán la relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas actuantes:

- **c´+ ϕ´+**
  Sin lluvia ni sismo y con lluvia y sin sismo:
  Fuerzas Resistentes: 3 x 5.5 + 2.0 = 18.5 T
  Fuerzas Actuantes: 15.3 T
  FS = 18.5 / 15.3 = 1.21

  Con sismo sin lluvia y con sismo y lluvia:
  Fuerzas Actuantes: 15.3 + 1.6 = 16.9
  FS = 18.5 / 16.9 = 1.09

- **c´+ ϕ´-**
  Sin lluvia ni sismo y con lluvia y sin sismo:
  Fuerzas Resistentes: 3 x 4.1 + 2.0 = 14.3 T
  Fuerzas Actuantes: 15.3 T
  FS = 14.3 / 15.3 = 0.96

  Con sismo sin lluvia y con sismo y lluvia:
  Fuerzas Actuantes: 15.3 + 1.6 = 16.9
  FS = 14.3 / 16.9 = 0.846

- **c´- ϕ´+**
  Sin lluvia ni sismo y con lluvia y sin sismo:
  Fuerzas Resistentes: 3 x 5.5 = 16.5 T
  Fuerzas Actuantes: 15.3 T
  FS = 16.5 / 15.3 = 1.08

Con sismo sin lluvia y con sismo y lluvia:
Fuerzas Actuantes: 15.3 + 1.6 = 16.9

FS = 16.5 / 16.9 = 0.97

- **c´- ϕ´-**
  Sin lluvia ni sismo y con lluvia y sin sismo:
  Fuerzas Resistentes: 3 x 4.1 = 12.3 T
  Fuerzas Actuantes: 15.3 T

  FS = 12.3 / 15.3 = 0.80

  Con sismo sin lluvia y con sismo y lluvia:
  Fuerzas Actuantes: 15.3 + 1.6 = 16.9

  FS = 12.3 / 16.9 = 0.73

Evaluación de Estabilidad de la Fuente de Amenaza No. 7

Se trata de establecer el Factor de Seguridad ante el giro del bloque en torno al punto B, en función de los parámetros de resistencia c´, ϕ´ y la resistencia a la tracción T, la cual puede ser obtenida de los dos primeros mediante la edpresión:

$$T = 2\, c' \cos \phi' / (1 + \operatorname{sen} \phi')$$

El peso unitario del material rocoso es de 1.94 t/m^3, según los datos reportados por NATIVA Ltda, en el estudio de estabilidad del barrio San Rafael.

De acuerdo al modelo geotécnico planteado, las siguientes fuerzas intervienen en el problema de estabilidad:

- **Fuerzas Estáticas Actuantes**
  Peso del Bloque: Para un volumen de 0.5 x 0.5 x 1.0, el peso del bloque es de 0.485 ton.
  Resistencia a la tracción T: depende de la cohesión y el ángulo de fricción, y según la ecuación de la parte superior:

	C´(kPa)	ϕ´	T (ton/m^2)
C+ ϕ´-	20	25	2.55
C+ ϕ´-	20	15	3.07
C+ ϕ´-	5	25	0.64
C+ ϕ´-	5	15	0.77

  El valor de T se multiplica por el área (0.5 x 1) para obtener el valor de l fuerza total de resistencia a la tracción, tal como se muestra en la figura No. 7.

- **Fuerzas Dinámicas Actuantes**
  Se considera la carga producida por sismo, que en este caso se aplica horizontalmente al bloque analizado, y tiene un valor de:

Fs = 0.24 g x 485 / 9.81 = 114 kg = 0.114 T

Con los valores anteriores, se determina el factor de seguridad, que es la relación entre las fuerzas resitentes y las fuerzas actuantes.

En el caso analizado, llamando A el área de contacto entre el bloque y el macizo, y sabiendo que éste tiene una inclinación de 20^0 respecto a la vertical, se obtienen las siguientes expresiones, provenientes de hacer momento M = 0 rn torno al punto B:

- En condición estática:

$$\Sigma M_B = (0.484 \times \cos 20 \times \cos 30) - T \times A$$

de donde:

FS = T x A / (0.484 x cos 20 x cos 30)

- Bajo carga sísmica:

$$\Sigma M_B = (0.484 \times \cos 20 \times \cos 30 + 0.114 \times \cos 20) - T \times A$$

de donde:

$$\mathbf{FS = T \times A / (0.484 \times \cos 20 \times \cos 30 + 0.114 \times \cos 20)}$$

Los resultados de este análisis, dados en térmonos de la probabilidad de falla, se presentan en la tabla No. 7 anexa.