

MODELOS GEOMATEMÁTICOS APLICADOS AOS MOVIMENTOS DE MASSA NA BACIA HIDROGRÁFICA DE SUCHIATE - GUATEMALA

RICARDO JORGE LIMA FERREIRA ALVES

Dissertação submetida para conclusão do

MESTRADO EM ENGENHARIA DE MINAS E GEO-AMBIENTE

Orientador: Professor Doutor Joaquim Góis

Co-Orientador: Professor Doutor Osmín J. Vásquez Hernández

OUTUBRO DE 2011

MESTRADO EM ENGENHARIA DE MINAS E GEOAMBIENTE 2010/2011

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência ao *Mestrado em Engenharia de Minas e Geoambiente - 2010/2011 - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Aos meus pais,

À minha irmã

À minha avó Teresa,

Aos meus amigos,

A todos o meu sincero agradecimento pelos apoios recebidos e pela felicidade com que sempre me rodearam.

A filosofia natural consiste na descoberta dos modos e operações da natureza [...] e, depois, na dedução das causas e efeito das coisas.

Isaac Newton

AGRADECIMENTOS

Quando iniciei este trabalho não sabia as dificuldades que encontraria no meu dia-a-dia, nem tão pouco se estava à altura do mesmo. Contudo, tinha uma certeza de que todos os momentos que dedicasse a este estudo valeriam sempre a pena, pois acabava sempre por descortinar algo e quiçá poder dar um pequeno contributo àqueles a quem, em primeiro, lugar interessa este tipo de estudo e que é a população generosa da República da Guatemala.

Pretendo expressar o meu especial e enorme reconhecimento ao Professor Doutor Joaquim Góis, pela oportunidade que me deu para desenvolver este estudo sob a sua superior orientação e pela transmissão de conhecimentos que, em todos os domínios, foram notáveis e os quais possibilitaram tornar este projeto uma realidade.

Igualmente desejo deixar aqui registado o meu profundo reconhecimento ao Professor Doutor Osmín J. Vásquez Hernández, pela objectividade dos ensinamentos e conselhos úteis, bem como pela paciência, compreensão e tempo que despendeu comigo ao longo dos quatro meses da minha permanência na Guatemala.

Devo também apresentar uma sincera palavra de agradecimento ao Engenheiro Jaime Requena pela sua bondade e pela constante disponibilidade de tempo, bem como pela preciosa partilha de informação e de conhecimentos, sem os quais este trabalho não ficaria tão rico.

Estou igualmente em dívida para com os alunos do curso de Engenharia Geológica do Centro Universitário do Norte da Universidade de San Carlos da Guatemala, cuja colaboração prestimosa foi importante para a obtenção de alguma informação de campo, o que possibilitou fazer este trabalho mais completo e de feição menos solitária.

RESUMO

A ocorrência de fenómenos naturais provoca, frequentemente, movimentos de grandes quantidades de solos superficiais e, conseqüentemente, perdas de vidas humanas e animais, bem como a destruição de plantações, infra-estruturas, entre outros. Com efeito, são frequentes os deslizamentos de massas nos países de climas tropicais possuidores de zonas montanhosas e de elevada pluviosidade, como é o caso da República da Guatemala. Esta realidade leva a que as autoridades Guatemaltecas considerem este tipo de fenómenos como uma das ameaças mais comuns e mais importantes a ter em conta na defesa de pessoas e bens.

É pois, neste enquadramento, que o presente trabalho se desenvolve, procurando, através de uma análise no contexto da estatística multi-variada (preconiza-se, como técnica estatística, a utilização da Análise Factorial das Correspondências - AFC), tratar e validar um estudo sobre algumas das variáveis em análise, que pensamos serem susceptíveis de intervir na dinâmica dos processos de movimentos de massa, nomeadamente *“altitude”, “inclinação”, “orientação”, “geologia”, “geomorfologia”, “densidade de alinhamentos estruturais” e “densidade de linhas de água”*. É de salientar que todas estas variáveis foram devidamente registadas em 7.740 pontos geográficos da Bacia Hidrográfica de Suchiate.

Estamos em crer que, com o presente trabalho, iniciámos um processo que no futuro permitirá consolidar um modelo estatístico de previsão de ocorrência de movimentos de massa. Tendo por base a aplicação da AFC a um conjunto alargado de variáveis condicionantes dos movimentos de massa, procuraram-se as estruturas relacionais fortes entre as variáveis e as modalidades associadas às respectivas variáveis.

Uma vez identificado o sistema de inter-dependência entre as modalidades que contribuem para os deslizamentos, fica estabelecido o primeiro passo para a construção de um modelo mais geral que tenha como objectivo minimizar os danos sociais, materiais e económicos potencialmente decorrentes dos movimentos de massa.

Palavras-Chave:

Bacia Hidrográfica Suchiate, Deslizamentos de massas, Análise Factorial de Correspondências.

ABSTRACT

The occurrence of natural phenomena often results on the movement of large quantities of surface soils. As a consequence, this leads to the loss of human lives, animals, and also to the destruction of crops, infrastructures, etc. The landslide of masses is indeed very frequent in countries with tropical climates that have mountainous areas and very high level of rainfalls, such as Guatemala. This reality makes national authorities to consider this type of phenomena as being one of the most common and important threats to be taken into consideration in the defense of people and their possessions.

This work has been developed considering this background. Through an analysis in the context of the multi-varied statistics (it is preconized as a statistics technique, the use of FAC - Factorial Analysis of Correspondences), this work treats and validates practical and comparative results between the studied variables that might influence the process dynamics of the mass movements. These variables are altitude, slope, orientation, geology, geomorphology, density of structural alignments, and density of the water lines. We have to enhance that all these variables have been registered in 7.740 geographic points of the Suchiate hydrological basin.

This work is the first step to consolidate a statistical model that might be used in the future to predict the occurrence of mass movements. This model will be based on the Factorial Analysis of Correspondence (FAC) using a wide group of conditioning variables that might potentially influence and contribute in an independent and significant way to the slide of masses. The final aim will be to minimize the consequent losses in material, social, and economic damages.

KEY WORDS

Suchiate Hydrological Basin, Slide masses, Factorial Analysis of Correspondences.

RÉSUMÉ

L'occurrence de phénomènes naturels provoque souvent, le mouvement de grandes quantités de sols de surface et, par conséquent, la perte de vies humaines, d'animaux, ainsi que la destruction de cultures, et des infrastructures, entre autres. En effet, les glissements de terrain sont fréquents dans les pays tropicaux qui possèdent des zones montagneuses et une pluviosité élevée, comme c'est le cas du Guatemala. A cause de cette réalité, les autorités guatémaltèques considèrent ce type de phénomènes comme l'une des menaces la plus courante et la plus importante à prendre en compte pour la défense des personnes et des biens.

C' est donc, dans ce cadre, que ce travail se développe, procurant à travers une analyse dans le contexte de la statistique à plusieurs-variables (il est recommandé, d'utiliser comme de technique statistique, l'analyse factorielle des correspondances - AFC), gérer et valider une étude de certaines des variables étudiées, qui nous paraissent susceptibles d'être impliquées dans la dynamique des processus de mouvements de masse, y compris «l'altitude», «l'inclinaison», «l'orientation», «la géologie», "la géomorphologie", "la densité des alignements structuraux" et "la densité des lignes d'eau." Notez que toutes ces variables ont été correctement enregistrées dans 7740 points géographiques du bassin hydrographique du Suchiate.

Nous croyons qu'avec le présent travail, nous avons commencé un processus qui, dans le futur, nous permettra de consolider un modèle statistique de prévisions des mouvements de terres. Basé sur l'application de l'AFC à un large éventail de variables qui conditionnent les mouvements de terres, on a cherché des structures qui ont une grande relation entre les variables et les modalités associées à ces même variables. Une fois identifié le système d'inter-dépendance entre les modalités qui contribuent aux glissements de terrain, on avance dans la construction d'un modèle plus général qui vise à minimiser les dommages sociaux, matériaux et économiques résultant des mouvements de terrain.

Mots-clés

BASSIN HYDROGRAPHIQUE DE SUCHIATE, GLISSEMENTS DE TERRAIN, ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES.

RESUMEM

La ocurrencia de fenómenos naturales provoca, frecuentemente, movimientos de enormes cantidades de tierras superficiales y, consecuentemente, la pérdida de vidas humanas, animales, así como la destrucción de plantaciones, infra-estructuras, entre otros. Los derrumbes de zonas pobladas son frecuentes en países de climas tropicales constituidos por zonas montañosas y de elevada pluviosidad, como es el caso de la Republica de Guatemala. Esta realidad lleva a las autoridades Guatemaltecas a considerar este tipo de fenómenos como una de las amenazas más comunes y más importantes a tener en cuenta para la defensa de personas y propiedades.

En este contexto es donde se desarrolla el presente trabajo, partiendo de un análisis de estadística multi-variada (utilizando como técnica estadística el Análisis Factorial de las Correspondencias - AFC) se busca realizar y validar un estudio sobre algunas de las variables que se consideran susceptibles de intervenir en la dinámica de los procesos de movimientos de masa y que son: *“altitud”, “pendiente”, “orientación de ladera”, “geología”, “geomorfología”, “densidad de lineamientos estructurales” y “densidad de líneas de agua”*. Cabe destacar que todas las variables fueron debidamente registradas en 7.740 puntos geográficos de la Cuenca Hidrográfica de Suchiate.

Se considera que el presente trabajo inicia un proceso que en el futuro permitirá consolidar un modelo estadístico de previsión de ocurrencia de derrumbes. Teniendo por base la aplicación de la AFC a un conjunto extendido de variables condicionantes de los movimientos de masa, se generan las estructuras relacionales fuertes (que es esto?) entre las variables y las modalidades? asociadas a las respectivas variables.

Una vez identificado el sistema de inter-dependencia entre las modalidades que contribuyen a los derrumbes, queda establecido el primero paso para la construcción de un modelo mas general que tiene como objetivo minimizar los daños sociales, materiales y económicos potencialmente ocasionados por los movimientos de masa.

Palabras-Chave:

Cuenca Hidrográfica Suchiate, Deslizamientos de massas, Análisis Factorial de Correspondencias.

ÍNDICE GERAL

PREFÁCIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1.2 ENQUADRAMENTO LEGAL	3
1.3 ESTRUTURA DA TESE	3
2 OBJECTIVOS E METODOLOGIA	5
2.1 OBJECTIVOS GERAIS	5
2.2 OBJECTIVOS ESPECÍFICOS.....	6
2.3 METODOLOGIA.....	6
3 CARACTERÍSTICAS DA GUATEMALA.....	9
3.1 GEOLOGIA	9
3.1.1 Estratigrafia	14
3.2 GEOMORFOLOGIA, TEMPERATURA E PLUVIOSIDADE.....	21
3.3 REGIÕES HIDROGRÁFICAS.....	24
3.4 EVENTOS GEOLÓGICOS	24
4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	29
4.1 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA	29
4.2 GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA.....	29
4.3 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS	35
5 TIPOLOGIA DOS MOVIMENTOS DE MASSA.....	37
5.1 FATORES CONDICIONANTES NOS MOVIMENTOS DE MASSA	41
5.1 TIPOS DE MOVIMENTOS	43
6 VARIÁVEIS DE ESTUDO	45
6.1 OBTENÇÃO DOS DADOS.....	46
6.2 VARIÁVEIS DE ESTUDO E SUA CODIFICAÇÃO.....	48
6.2.1 Altitude (z)	48
6.2.2 Inclinação (i)	49
6.2.3 Orientação das encostas (o)	49
6.2.4 Geologia (ge).....	50
6.2.5 Geomorfologia (gm)	51
6.2.6 Densidade de linhas de superfície (sl)	51
6.2.7 Densidade de linhas de água (wl)	52
7 ANÁLISE ESTATÍSTICA APLICADA AOS MOVIMENTOS DE MASSA	55

7.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA APLICADA AOS MOVIMENTOS DE MASSA	56
7.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA.....	59
7.3 ANÁLISE FACTORIAL DAS CORRESPONDÊNCIAS	59
7.4 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS EM AFC.....	60
7.5 APLICAÇÃO DA AFC AOS DADOS EM ESTUDO	61
8 RESULTADOS	71
9 CONCLUSÕES	81
POSFÁCIO	
10 BIBLIOGRAFIA.....	85
ANEXO A - MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA - CLASSIFICAÇÃO DOS DESLIZAMENTOS	2A
ANEXO B - RESULTADOS ANDAD	1B
ANEXO C - ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	1C
ANEXO D - MODELOS ESTATÍSTICOS MULTIVARIADOS APLICADOS NO ESTUDO DE MOVIMENTOS DE MASSA NA BACIA HIDROGRÁFICA DE SUSCHiate (GUATEMALA)	1D

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - PLACAS TECTÓNICAS, CONTINENTE AMERICANO.....	10
FIGURA 2 - ZONA DE SUBDUCÇÃO, AMÉRICA CENTRAL	10
FIGURA 3 - LINHA VULCÂNICA, GUATEMALA	11
FIGURA 4 - MOVIMENTOS DE TRANSCORRENCIA, AMÉRICA CENTRAL	12
FIGURA 5 - FALHAS GEOLÓGICAS, GUATEMALA	12
FIGURA 6 - MAPA GEOLÓGICO DA REPUBLICA DA GUATEMALA	15
FIGURA 7 - ISOMETRIAS DE TEMPERATURA MÉDIA ANUAL ENTRE 1925-2003	23
FIGURA 8 - ACONTECIMENTOS GEOLÓGICOS NA GUATEMALA NOS ÚLTIMOS 3 ANOS	25
FIGURA 9 - EVENTOS GEOLÓGICOS E TOTAL DE EVENTOS NOS ÚLTIMOS 3 ANOS	26
FIGURA 10 - PESSOAS FALECIDAS POR EVENTO GEOLÓGICO E PESSOAS FALECIAS NO TOTAL DE ACIDENTES .	26
FIGURA 11 – EVENTOS GEOLÓGICOS - NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA, SISMOS E VULCANISMO EM 2008-2010.....	27
FIGURA 12 – REGISTOS DAS PESSOAS FALECIDAS POR MOVIMENTO DE MASSA, SISMO, VULCANISMO E SOMA GLOBAL – 2008-2010.....	27
FIGURA 13 – NÚMERO DE PESSOAS AFECTADAS POR EVENTOS GEOLÓGICOS – 2008-2010.....	28
FIGURA 14 - MAPA FISIAGRÁFICO E GEOMORFOLÓGICO DA BACIA HIDROGRÁFICA DE SUCHIATE	33
FIGURA 15 - MAPA DAS SERIES DE SOLOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DE SUCHIATE	34
FIGURA 16 - ALTIMETRIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DE SUCHIATE	36
FIGURA 17 - LOCAIS DE MOVIMENTOS DE MASSA NA BACIA HIDROGRÁFICA DE SUCHIATE (PONTOS ASSINALADOS A PRETO).....	47
FIGURA 18 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DE NÃO REPRESENTATIVIDADE DAS VARIÁVEIS NO PLANO FACTORIAL	60
FIGURA 19 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DE RELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS	61
FIGURA 20 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DE RELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS	61
FIGURA 21 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DE RELAÇÃO INVERSA ENTRE AS VARIÁVEIS	61
FIGURA 22 - MATRIZ DE PARTIDA PARA A ANÁLISE FACTORIAL DAS CORRESPONDÊNCIAS (AFC).....	65
FIGURA 23 - RETROACÇÃO EM ANÁLISE FACTORIAL).....	66
FIGURA 24 - PLANO GERAL DOS ENSAIOS DESTINADOS A EXPLORAR OS DADOS INICIAIS EM TERMOS DE AFCB.....	69
FIGURA 25 - AFCB - PROJECCÕES DAS MODALIDADES NO PLANO FACTORIAL 1,2 – ENSAIO 1	72
FIGURA 26 - AFCB - PROJECCÕES DAS VARIÁVEIS NO PLANO FACTORIAL 1,2 – ENSAIO 2	75
FIGURA 27 - AFCB - PROJECCÕES DAS VARIÁVEIS NO PLANO FACTORIAL 1,3 – ENSAIO 2	76
FIGURA 28 - AFCB - PROJECCÕES DAS MODALIDADES NO PLANO FACTORIAL 1,4 – ENSAIO 2	76
FIGURA 29 - AFCB - PROJECCÕES DAS MODALIDADES NO PLANO FACTORIAL 1,5 – ENSAIO 2	77
FIGURA 30 - AFCB - PROJECCÕES DAS MODALIDADES NO PLANO FACTORIAL 1,6 – ENSAIO 2	78

FIGURAS ANEXO A

FIGURA 1A - QUEDA DE BLOCOS	2A
FIGURA 2A - QUEDAS DE DETRITOS	3A
FIGURA 3A- DESLIZAMENTO ROTACIONAL	3A
FIGURA 4A – EXEMPLO DE DESLIZAMENTO ROTACIONAL	4A
FIGURA 5A- INSTABILIDADE CAUSADA POR CONSTRUÇÃO DE VIA	4A
FIGURA 6A – EXEMPLOS DE DESLIZAMENTOS TRANSLACIONAIS.....	5A
FIGURA 7A - FLUXOS DE REPTAÇÃO	6A
FIGURA 8A - FLUXOS DETRÍTICOS.....	7A
FIGURA 9A - SOLIFLUXÃO	8A
FIGURA 10A - FLUXO DE LAMA	8A

FIGURAS ANEXO C

FIGURA 1C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – MODALIDADES PARA AS CARACTERÍSTICAS DE ALTIMETRIA.....	1C
FIGURA 2C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – MODALIDADES PARA AS CARACTERÍSTICAS DE ALTIMETRIA - DISJUNTIVA	2C
FIGURA 3C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – MODALIDADES PARA AS CARACTERÍSTICAS DE INCLINAÇÃO.....	2C
FIGURA 4C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – MODALIDADES PARA AS CARACTERÍSTICAS DE INCLINAÇÃO - DISJUNTIVA	3C
FIGURA 5C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – SUSCEPTIBILIDADE DA INCLINAÇÃO.....	3C
FIGURA 6C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – MODALIDADES PARA AS CARACTERÍSTICAS DE ORIENTAÇÃO DE ENCOSTA.....	4C
FIGURA 7C– NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – MODALIDADES PARA AS CARACTERÍSTICAS DE ORIENTAÇÃO DE ENCOSTA – DISJUNTIVA	4C
FIGURA 8C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – MODALIDADES PARA AS CARACTERÍSTICAS DA GEOMORFOLOGIA	5C
FIGURA 9C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – MODALIDADES PARA AS CARACTERÍSTICAS DA GEOMORFOLOGIA – DISJUNTIVA.....	5C
FIGURA 10C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – SUSCEPTIBILIDADE PARA A GEOMORFOLOGIA	6 C
FIGURA 11C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – MODALIDADES DAS CARACTERÍSTICAS DA GEOLOGIA.....	6C
FIGURA 12C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – MODALIDADES DAS CARACTERÍSTICAS DA GEOLOGIA - DISJUNTIVA	7 C

FIGURA 13C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – SUSCEPTIBILIDADE PARA A GEOLOGIA.....	7 C
FIGURA 14C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – DENSIDADE DE LINHAS DE SUPERFÍCIE	8 C
FIGURA 15C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – DENSIDADE DE LINHAS DE SUPERFÍCIE - DISJUNTIVA	8C
FIGURA 16C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – SUSCEPTIBILIDADE PARA LINHAS DE SUPERFÍCIE	9C
FIGURA 17C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – DENSIDADE DE LINHAS DE ÁGUA	10C
FIGURA 18C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – DENSIDADE DE LINHAS DE ÁGUA - DISJUNTIVA.....	10C
FIGURA 19C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – SUSCEPTIBILIDADE DAS LINHAS DE ÁGUA	11C

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - PRINCIPAIS OCORRÊNCIAS DE MOVIMENTOS DE MASSAS NA GUATEMALA (2000-2010)	25
TABELA 2 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DE SUCHIATE	31
TABELA 3 - CLASSIFICAÇÃO DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA	44
TABELA 4 - CODIFICAÇÃO DA VARIÁVEL ALTITUDE E RESPETIVAS MODALIDADES	48
TABELA 5 - CODIFICAÇÃO DA VARIÁVEL INCLINAÇÃO E RESPETIVAS MODALIDADES	49
TABELA 6 - CODIFICAÇÃO DA VARIÁVEL ORIENTAÇÃO DE ENCOSTA E RESPETIVAS MODALIDADES	50
TABELA 7 - CODIFICAÇÃO DA VARIÁVEL GEOLOGIA E RESPETIVAS MODALIDADES.....	50
TABELA 8 - CODIFICAÇÃO DA VARIÁVEL GEOMORFOLOGIA E RESPETIVAS MODALIDADES	51
TABELA 9 - CODIFICAÇÃO DA VARIÁVEL DENSIDADE DE LINHAS DE SUPERFÍCIE E RESPETIVAS MODALIDADES.	52
TABELA 10 - CODIFICAÇÃO DA VARIÁVEL DENSIDADE DE LINHAS DE ÁGUA E RESPETIVAS MODALIDADES.....	53
TABELA 11 - DIVISÃO DAS VARIÁVEIS, RESPECTIVAS MODALIDADES, CODIFICAÇÃO, FREQUÊNCIA ABSOLUTA E RELATIVA.	57 E 58
TABELA 12 – SUBDIVISÃO DAS VARIÁVEIS NAS DIFERENTES MODALIDADES, CODIFICAÇÃO, FREQUÊNCIA ABSOLUTA E RELATIVA.....	63 E 64
TABELA 13 - EXCERTO DA MATRIZ DE DADOS CODIFICADA EM DISJUNTIVA COMPLETA COM AS MODALIDADES UTILIZADAS NA AFCB.....	67
TABELA 14 - TAXA DE EXPLICAÇÃO E SUA ACUMULADA – ENSAIO 2.....	69
TABELA 15 - RELAÇÕES DE PROXIMIDADE/AFASTAMENTO ENTRE AS MODALIDADES NOS EIXOS FACTORIAIS CONSIDERADOS (ENSAIO 1)	71
TABELA 16 - RELAÇÕES DE PROXIMIDADE/AFASTAMENTO ENTRE AS MODALIDADES NOS EIXOS FACTORIAIS CONSIDERADOS (ENSAIO 2)	73

TABELAS ANEXO A

TABELA 1A - ELEMENTOS SIGNIFICATIVOS NA DESCRIÇÃO DE UM MOVIMENTO DE MASSA	11A
TABELA 2A - ESTILO DO DESLIZAMENTO	11A
TABELA 3A – CLASSIFICAÇÃO DA VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO	12A
TABELA 4A - ESTADO DE ACTIVIDADE DO ESCORREGAMENTO	13A
TABELA 5A - CLASSIFICAÇÃO DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA DE ORIGEM SÍSMICA SEGUNDO KEEFER	14A
TABELA 6A - FACTORES CONDICIONANTES RELEVANTES PARA CADA TIPO DE MOVIMENTO DE MASSA SEGUNDO HAUSER	15A
TABELA 7A - FACTORES CONDICIONANTES E VARIÁVEIS DE ESTUDO	17A

TABELAS ANEXO B

TABELA 1B - COORDENADAS DAS MODALIDADES NOS EIXOS FACTORIAIS – 2º ENSAIO 1B

TABELA 2B - CONTRIBUIÇÕES ABSOLUTAS SUPERIORES A 4 (100/26 MODALIDADES) - 2º ENSAIO 3B

PREFÁCIO

Remonta já ao século XV, quando “o mar unia, já não separava”, o início das trocas de mercadorias e também de culturas entre a Europa e os outros continentes. A evolução que ocorreu desde então em termos científicos, políticos e sociais conduziu à aldeia global em que hoje vivemos e que permite cada vez mais o intercâmbio não só de pessoas e bens mas também de conhecimentos, ideias e costumes entre as diversas populações.

É neste contexto que o programa Erasmus Mundus External Cooperation Window (EM ECW) assume um papel de relevo no fortalecimento da cooperação internacional, proporcionando uma oportunidade inigualável a estudantes e investigadores de tomarem contacto com a realidade de outros países e de aí aplicarem conhecimentos previamente adquiridos em contextos substancialmente diversos.

O supra referido programa, ao ser pautado por objectivos como a promoção das relações políticas, culturais, educativas e económicas entre a União Europeia e os países em vias de desenvolvimento, permite o desenvolvimento de projetos de grande interesse científico e académico e que têm como denominador comum a cooperação entre as nações para um harmonioso desenvolvimento em termos globais.

No presente caso, o intercâmbio realizou-se na cidade de Cobán, no Centro Universitário Norte da Universidade de San Carlos (CUNOR), Guatemala, em parceria com a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.

Esta dissertação teve por motivação o conhecimento dos prejuízos que ocorrem quando se verificam movimentos de massa, bem como a tomada de consciência de que se poderia contribuir cientificamente para a sua avaliação prevenção e dos riscos ocasionados por este tipo acidentes geológicos.

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AFC – Análise Factorial das Correspondências

AFCB – Análise Factorial das Correspondências Binárias

BHS – Bacia Hidrográfica de Suchiate

C_i – Classe de índice i , com $i = 1, 2, 3, \dots, n$

CONRED – Coordenadora Nacional para a Redução de Desastres (Guatemala)

CUNOR – Centro Universitário Norte da Universidade de San Carlos

DEM – Modelo de Elevação Digital

EM ECW – Erasmus Mundus External Cooperation Window

F_i – Eixo Factorial i com $i = 1, 2, 3, \dots, n$

GIS – Sistema de Informação Geográfica

gm – Geomorfologia

ge – Geologia

IAEG – Internacional Association for Engineering Geology and the Environment

i – Inclinação

IGN – Instituto Geográfico Nacional da Guatemala

IST – Instituto Superior Técnico

l_s – Densidade de linhas de superfície

msnm – Metros sobre o nível de mar

o – Orientação das encostas

R_h – Coeficiente de relevo

R_r – Coeficiente de robustez

s – Susceptibilidade

UTM – Universal Transverse Mercator

w_l – Densidade de linhas de água

z – Altitude

% ACU – Taxa de inércia acumulada

% EXP – Taxa de inércia transportada

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os acidentes ambientais são comuns, por vezes constantes e perigosos, e são geralmente considerados como uma catástrofes naturais. Podem ocorrer sobre a forma de ameaça por sismo, tsunamis, furacões, pluviosidade intensa e consequentes cheias, vulcanismo ou movimentos de massas.

Com efeito, os fenómenos meteorológicos El Niño e Agatha, bem como os tsunamis asiáticos, despertaram a atenção mundial pelo elevado número de vítimas ocorridas e pelas perdas registadas em bens patrimoniais. Apesar de terem acontecido em locais longínquos, a percepção que pode acontecer a qualquer momento e em qual quer lugar é uma realidade. Tanto assim, que no pretérito dia 11 de Março findo, um sismo de magnitude 9, seguido de um tsunami, abalou o Japão. Com esta catástrofe registaram-se mais de 10.000 mortes, 300.000 desalojados e muitos desaparecidos (dados oficiais). As perdas materiais são ainda incalculáveis. A estes factos, é de acrescentar ainda a ameaça nuclear devido às explosões de alguns reactores na Central Nuclear de Fukushima.

São de referir também alguns acidentes relacionados com os movimentos de massa os quais são agora o objecto deste estudo. Com efeito, é de anotar a catástrofe verificada na ilha Leyte nas Filipinas, em 2006, que foi um dos mais marcantes ao retirar a vida a 1100 pessoas, o verificado no Uganda, em Março de 2010, com 54 mortes a lamentar, bem como o sucedido na cidade do Rio de Janeiro, Brasil, que, em Janeiro de 2011, vitimou cerca de 916 pessoas, entre outros acontecimentos desta natureza registados em muitos outros locais do nosso planeta. Para além da perda de vidas humanas, os movimentos de massa também são responsáveis por ocasionar elevados prejuízos materiais, tanto nas infra-

estruturas como na agricultura, aonde grande parte das culturas fica destruída durante largos anos.

Por estes acontecimentos se verificarem frequentemente, é que as autoridades governamentais têm vindo a dar uma maior importância aos riscos ambientais, devido às consequências resultantes da sua ocorrência e em especial os movimentos de massa em que, pela normal tendência para o aumento da ocupação sucessiva de zonas de encostas íngremes, estes passam a exercer um potencial risco para as populações sob o ponto de vista socioeconómico.

Com efeito, o crescimento demográfico verificado a nível mundial originou, em alguns pontos do globo, a expansão dos grandes centros urbanos até zonas montanhosas que rodeiam os vales. Por este motivo, é fundamental existir uma tomada de consciência da importância do tema para o ordenamento do território, de forma a se minimizarem as consequências graves que podem advir dos movimentos de massa associados a zonas de encosta.

Para tal, será necessário fazer uma avaliação das características destes fenómenos, da sua ocorrência no tempo e lugar, da sua dependência de factores desencadeantes (naturais ou induzidos) e dos respectivos factores condicionantes. Neste sentido, será importante fazer-se uma adequada classificação dos terrenos, acção esta que irá possibilitar um melhor urbanismo e/ou prevenção de danos provocados às populações e aos seus bens.

Por tudo isto, é importante identificar os potenciais riscos geológicos que possam afectar as populações, pelo que é necessário que os profissionais especialistas no tema de movimentos de massa e as autoridades locais, procurem instruir e preparar as populações de forma a se evitar e/ou minimizar este tipo de acontecimentos. Esta acção ajudará a prevenir, a diminuir ou a evitar alguns danos, tanto em bens materiais como em vidas humanas, que os movimentos de massa ocasionam, pois são praticamente inevitáveis quando ocorrem por origem natural.

Neste sentido, são importantes todos os trabalhos com base científica que possam contribuir para se monitorizar as situações de susceptibilidade, visto que os riscos de movimentos de massa são possíveis de acontecer em muitas áreas do nosso planeta.

É, pois, na exploração e tratamento dos registos dos acontecimentos passados que poderão servir de base para o desenvolvimento de um modelo geomatemático, o qual tenha a possibilidade de fornecer resultados que permitirão, com efeito, observar em que estágio se encontra uma determinada área de terreno à susceptibilidade a movimentos de massa. Esta

temática é, actualmente, uma das mais importantes para de se realizar na salvaguardar de pessoas e bens (Eeckhaut, et. al.,2009).

1.2 ENQUADRAMENTO LEGAL

Não existem referências ao enquadramento legal dos riscos provocados pelos movimentos de massa quer na União Europeia quer na Guatemala. Contudo, pensamos ser urgente contextualizar em diploma de lei algumas normas a fixar por forma a classificar as partes do território mais sujeita a este tipo de fenómenos. Impõe-se modelos de previsão de novas ocorrências, a realização de mapas de susceptibilidade com vista à proteção de pessoas e bens e à salva guarda dos interesses colectivos.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

O presente trabalho encontra-se estruturado em três partes distintas.

A primeira parte, diz respeito ao presente capítulo no qual se procede ao enquadramento geral sobre o assunto em estudo, e onde se definem objectivos e se estabelece uma metodologia de trabalho.

Na segunda parte do trabalho desenvolvem-se não só as características geomorfológicas da Guatemala mas também da caracterização particular da área em estudo. Englobado nesta parte do trabalho, são identificadas as tipologias dos movimentos de massa (capítulo 3, 4 e 5).

Na última parte do trabalho (capítulos 6, 7 e 8) identificam-se as variáveis em estudo e procede-se ao tratamento estatístico de todas as variáveis e interpretam-se os resultados obtidos.

2

OBJECTIVOS E METODOLOGIA

A elaboração deste trabalho tem como objectivo a apresentação de um estudo com base em modelos geomatemáticos, os quais auxiliem a fazer avaliações, interpretações, análises e entendimentos sobre os movimentos de massa, e isto, para uma melhor gestão dos riscos neste domínio. Neste contexto, estamos também convictos que estes modelos poderão ser aplicados e desenvolvidos para outras regiões. Com efeito, a metodologia desenvolvida procura ser independente da área em estudo, isto é, procura-se que seja aplicável em diversas condições geológicas e geográficas quer do território nacional Guatemalteco quer de outro qualquer território, salvo casos singulares. Igualmente se procura como objectivo dar um pequeno contributo para a segurança das pessoas e para a melhoria do ordenamento do território da Guatemala.

Nesta conformidade, procura-se com a presente dissertação realizar os seguintes objectivos gerais e específicos.

2.1 OBJECTIVOS GERAIS

Como objectivos gerais de trabalho na Guatemala podemos indicar os seguintes:

- Avaliação geral dos riscos ambientais (essencialmente na perspectiva dos movimentos de massa);
- Avaliação da disponibilidade e adequação da informação sobre movimentos de massa;
- Analisar alguns factores desencadeantes de movimentos de massa.

A partir destes objectivos gerais, foi possível identificar uma área de intervenção para o estudo pretendido e que, no presente caso, se trata de todos os terrenos que fazem parte da envolvente da Bacia Hidrográfica de Suchiate, como adiante será referido.

2.2 OBJECTIVOS ESPECÍFICOS

No que respeita aos objectivos específicos, depois de definida a área de estudo, é de mencionar os seguintes:

- Caracterizar geologicamente os solos e as rochas condicionantes de movimentos de massa;
- Identificar outros parâmetros desencadeantes para a ocorrência de movimentos de massa;
- Identificar as áreas mais propícias a movimentos de massa e as suas características principais;
- Desenvolver um modelo de base estatístico, que identifique algumas das relações entre as variáveis que contribuem para a ocorrência de movimentos de massa. Este modelo ir-se-á basear na Análise Factorial das Correspondências (AFC), segundo um conjunto alargado de variáveis condicionantes, potencialmente influentes e que contribuem de forma independente e significativa para os deslizamentos de massas;
- Avaliar a conformidade de possíveis ocorrências de movimentos de massa na bacia hidrográfica de Suchiate, segundo o modelo geomatemático elaborado;
- Desenvolver uma metodologia que possa contribuir para a avaliação dos riscos ocasionados pelos movimentos de massa e que seja aplicável em várias condições geológicas e geográficas;

Por sua vez, o grande objectivo deste trabalho passará sempre por tentar contribuir para a melhoria do ordenamento do território na Bacia Hidrográfica de Suchiate e para a segurança de todas as pessoas que vivam nesta área.

2.3 METODOLOGIA

De uma forma sintética pode-se referir os passos seguidos na investigação deste trabalho e que foram os seguintes:

- Definição da área de estudo;
- Levantamento da informação já existente e que era de interesse para o estudo;
- Estudo e caracterização dos solos segundo os seus principais componentes;
- Estudo e determinação dos factores condicionantes que poderiam contribuir fortemente para os movimentos de massa;

- Selecção dos métodos (modelos geomatemáticos) adequados aos estudos estatísticos;
- Tratamento da informação para a utilização eficiente dos sistemas de análise de dados;
- Verificação interpretação e validação dos resultados obtidos.

3

CARACTERÍSTICAS DA GUATEMALA

O presente capítulo baseia-se na informação cedida pelos Professores Jaime Requena e Osmin Hernández.

3.1 GEOLOGIA

O território da República da Guatemala situa-se na América Central. A sua geografia física é em grande parte montanhosa (cerca de três quintos do seu território) e de origem vulcânica. Possui zonas costeiras suaves no seu litoral pacífico e planícies baixas compostas por calcários a norte do país. É atravessada na sua parte central pela cordilheira dos Cuchumatanes e parte da serra Madre del Sur. O litoral costeiro da Guatemala tem uma extensão total de 402 km, a costa caribenha com 148 km está compreendida entre o mar das Caraíbas e o golfo das Honduras, onde se situa a baía de Amatique. O litoral da costa do pacífico é mais extenso e tem cerca de 254 km.

É um país que apresenta uma geologia muito diversificada, no qual se podem observar bacias estruturais e estratigráficas diferentes, como são os casos das bacias: Petén, Amatique e Pacífica. Também apresenta outros rasgos estruturais importantes, como seja a zona de falha transcorrente, onde se encontram os sistemas Polochic-Motagua-Jocotán, os quais atravessam o país de nordeste a sudoeste.

Com o objectivo de se entender a geologia da Guatemala, é fundamental também situá-la dentro do contexto da evolução tectónica das Caraíbas. Com efeito, o território da Guatemala está relacionado com os designados pontos triplos (entre três placas tectónicas), dados pelos movimentos entre as placas Norte Americana, a das Caraíbas e a dos Cocos (Figura 1). De uma forma geral, pode-se afirmar que a Guatemala tem dois tipos diferentes de terrenos geológicos, os quais estando atualmente justapostos, mas estiveram no passado separados, referimo-nos aos terrenos a Norte da zona de falha de Motagua,

pertencente à placa Norte Americana, e aos terrenos da região a Sul corresponde à placa das Caraíbas.



FIGURA 1 - PLACAS TECTÓNICAS, CONTINENTE AMERICANO
FONTE: (SÁNCHEZ, 2010).

A zona de falha de Motagua e as zonas de falha associadas de Polochic e Jocotán formam um limite de placas passivas, com um movimento lateral para a esquerda enquanto a parte mais a Sul, paralela a costa do Pacífico, desde Acapulco (México) até a península de Nicoya (Costa Rica), apresenta a fossa ou trincheira da América-Central e/ou Meso-Americana, que é uma depressão batimétrica que contorna a América Central e constitui uma margem activa entra a placa de Cocos por baixo da das Caraíbas, fenómeno este conhecido por subducção (Figura 2).



FIGURA 2 - ZONA DE SUBDUCÇÃO, AMÉRICA CENTRAL
FONTE: (SÁNCHEZ, 2010).

A grande dimensão do contacto da zona de subducção provoca uma energética actividade vulcânica na planície costeira da zona de costa pacífica, originando uma grande quantidade de sismos e formações vulcânicas. É de notar que a sudoeste do país se localizam 33 vulcões, 4 dos quais estão presentemente em actividade (Figura 3). Entre as maiores formações montanhosas são de destacar-se as que correspondem à Serra Madre, Serra de Chuacús, Serra das Minas e Serra dos Cuchumatanes, que apresentam de uma forma geral, eixos com orientação aproximada Este-Oeste variando de Noroeste a Sudeste.

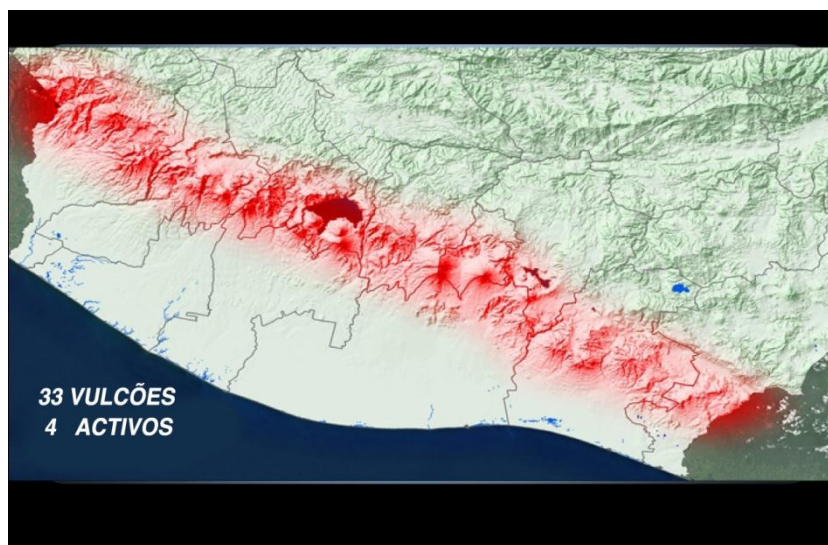


FIGURA 3 - LINHA VULCÂNICA, GUATEMALA
FONTE: (SÁNCHEZ, 2010).

No lado sudeste ocorre a colisão entre a placa das Caraíbas e Norte Americana formando um movimento tectónico transcorrente (Figura 4).

Para além das falhas tectónicas, existe uma grande quantidade de falhas vulcânicas de menor dimensão com uma orientação aproximada Norte-Sul do tipo normal, que se formaram devido a força de tensão no córtex, como consequência dos deslocamentos relativos às placas tectónicas e do vulcanismo associado. As falhas principais deste grupo são as falhas de Mixto, Santa Catarina Pinula, falha de Zunil e as falhas de orientação Este-Oeste, como as de Jalpatagua, Olinstepeque e outras de menor extensão. Outra falha estrutural muito característica é a orientação Noroeste-Sudeste dos edifícios vulcânicos, os quais se associam aos horst e graben de direcção Norte-Sul. Ao longo deste cinturão vulcânico, que deu origem a depressões tectónico-vulcânicas sobrepostas por depósitos vulcânicos, formaram-se largos vales e planaltos, como o da capital, a cidade da Guatemala.

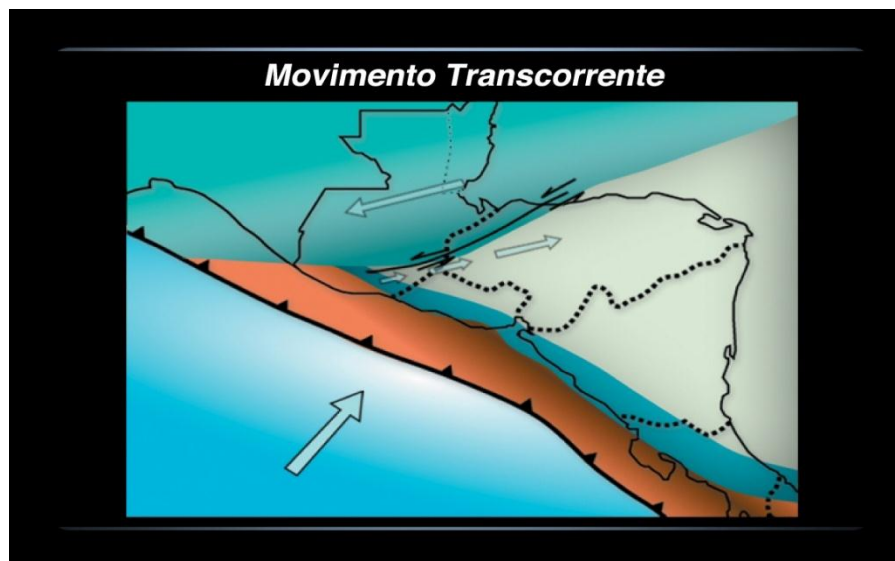


FIGURA 4 - MOVIMENTOS DE TRANSCORRENCIA, AMÉRICA CENTRAL
FORTE: (SÁNCHEZ, 2010).

Os movimentos transcorrentes são de origem sísmica, os quais estão na base da formação das cadeias montanhosas na área da Serra das Minas, tendo como ponto de partida a falha do rio Motagua, no vale com o mesmo nome. Os movimentos estão bem representados pelas falhas de Chicxoy-Polochic, Motagua e Jocotán-Chamelecón, como se pode observar na Figura 5.



FIGURA 5 - FALHAS GEOLÓGICAS, GUATEMALA
FORTE: (SÁNCHEZ, 2010).

A serra Madre atravessa o país de oeste a este, alinhada paralelamente ao pacífico e prolonga-se até às Honduras pela montanha Cerro Oscuro.

A conjugação dos factores anteriormente referidos e ao constante dinamismo terrestre, faz com que o território da Guatemala esteja submetido a frequentes sismos e erupções vulcânicas, sendo por isso um dos países mais vulcânicos do mundo. Da grande quantidade de vulcões existentes na Guatemala é de destacar o vulcão de Tajumulco (4.220 msnm), compondo o pico mais alto da América Central.

Considerando as variações geológicas, topografias, climáticas, fisiográficas, e a influência que estes componentes geram na capacidade de ocorrência de movimentos de massa, o território nacional da Guatemala pode dividir-se nas seguintes 7 regiões naturais.

- **Terra de Costa do Pacífico:** É constituída pelos departamentos de San Marcos, Quetzaltenango, Retalhuleu, Suchitepéquez, Escuintla, Santa Rosa e Jutiapa. Consiste numa facha de terra que vai desde a fronteira do México (rio Suchiate), a noroeste, até ao rio Paz na fronteira com El Salvador, a sudoeste. O limite norte da região confina com as Terras Vulcânicas da Bocacosta e o limite sul confina com o oceano pacífico;
- **As terras vulcânicas da Bocacosta:** Trata-se de uma facha de território limitada a sul pela planície Litoral do Pacífico e a norte com as Terras Altas Vulcânicas;
- **Terras Altas Vulcânicas:** Estas terras constituem os departamentos de San Marcos, Quetzaltenango, Totonicapán, Sololá, Chimaltenango, Sacatepéquez, Guatemala, Jalapa, Santa Rosa, Zacapa, Chiquimula e Jutiapa. Compreende o que se conhece como planalto da Guatemala e abrange a parte ocidental e central;
- **Terras Metamórficas:** Esta região abrange os limites dos departamentos de Quiché, BajaVerapaz, El Progreso, Zacapa, Chiquimula e Izabal. O extremo sul desta região é constituído pelas terras altas vulcânicas e no extremo norte por materiais calcários. Deste ponto de vista orográfico, a serra de Chuacús, a serra das Minas e as montanhas de Mico constituem uma boa parte das terras incluídas nesta região;
- **Terras Altas Calcárias do Norte:** Os departamentos que são abrangidos por esta região são: Huehuetenango, Quiché, Alta Verapaz e Izabal, e as montanhas de Cuchumatanes, formadas por materiais sedimentares e com uma altura máxima de 3600 msnm;
- **Terras Baixas Calcárias do Norte:** Esta região compreende todo o departamento de Petén, assim como uma parte de Alta Verapaz. A região fisiográfica e a planície inferior baixa de Petén, também faz parte desta área;
- **Terras de planícies de inundação do Norte:** É composta por partes do país que apresenta áreas com alta similitude biofísica e compreendem também a parte baixa

de duas bacias hidrografias importantes, Polochic – Río Dulce e Motagua. De acordo com a divisão administrativa, a primeira parte compreende o que se denomina por depressão de Polochic e inclui uma parte alta de Verapaz e de Izabal, enquanto a segunda parcela constitui a parte baixa da bacia hidrográfica do rio Motagua que faz parte do departamento de Izabal.

3.1.1 ESTRATIGRAFIA

A divisão entre os blocos Maya e Chortis é a designada zona de sutura de Motagua, cuja extensão a Oeste está coberta por rochas vulcânicas do terciário.

O bloco Maya inclui parte da Guatemala a Norte da zona de sutura, Belize, a península de Yucatán e o Oeste do istmo de Tehuantepec, México.

O bloco de Chortís consiste na parte Sul da Guatemala, El Salvador, Honduras e parte da Nicarágua.

Como se pode observar no mapa geológico 1:1 000 000 (Figura 6), a Guatemala distingue-se pela grande quantidade de unidades litológicas, as quais, começando-se pela mais antiga, se podem descrever da seguinte forma:

– **Rochas Metamórficas (Paleozóicas)**

São predominantemente as rochas que formam o Grupo Chuacús, definidas na Serra de Chuacús, as quais se estendem a todo o comprimento (de oriente a ocidente) da parte central do país e são constituídas principalmente por rochas filitas, gnaisses, mármore e migmatites. Encontram-se numa faixa que vai de Este a Oeste, aflorando a Oeste e Norte de San Marcos, a Sul e Este de Huehuetenango, no Sul de Quiché, Alta Verapaz, Izabal, Jalapa, Jutiapa, cobrindo quase totalmente os departamentos de Baixa Verapaz, El Progreso e Zacapa.

Todas estas rochas são de idade Paleozóica e estima-se que o Grupo Chuacús poderá ter uma idade de 1,075 milhões de anos, sendo provável que o primeiro metamorfismo tenha ocorrido durante o Devónico Superior, simultâneo ao surgimento do Granito Rabinal.

– **Rochas Sedimentares do Carbonífero e Pérmico**

Correspondem ao Grupo Santa Rosa, que se divide nas Formações Chicol, Tactic, La Esperanza e Chóchal. Neste grupo foram agregados lutitos, arenitos, conglomerados, filitos e carbonatos; encontra-se de Este a Oeste nos departamentos de Huehuetenango, Quiché, Baixa Verapaz, Alta Verapaz e Izabal; sendo que também se formaram a Sudeste de Petén e no centro de Belize.

Estas rochas são de idade do Carbonífero ao Pérmico superior. O ambiente de sedimentação é de água superficial e de recife traseiro, sugerido isto pelo calcário Chóchal.

– **Formação Todos Santos (Jurássico)**

Esta unidade define-se como uma sequencia continental e marinha de capas vermelhas do Jurássico superior, que aflora na povoação de Todos Santos, nos Altos Cuchumatanes. É constituída por uma sequência de conglomerados, limonite-lutito e arenitos, que se observam à superfície, principalmente no departamento de Huehuetenango e Quiché, existindo ainda pequenas áreas em Verapazes e a Sul de Petén. Supõe-se que esta unidade está relacionada com três episódios paleogeográficos, a saber:

- o primeiro episódio corresponde à deposição de arenitos e conglomerados, predominantemente de idade Jurássico médio-tardio. Esta deposição corresponde à fase inicial de abertura e expansão do fundo oceânico do Golfo do México;
- o segundo episódio coincide com a extensão da plataforma carbonatada durante a idade do Kimmeridgiano-Tithoniano;
- o terceiro e último episódio, demonstra o regular desenvolvimento de depósitos detríticos continentais, correlacionando-se este com uma diminuição do nível do mar (Barrier , Bourgois, & Michaud, 1990).

– **Carbonatos do Cretácico**

Compreende as formações Cobán e Campur. A Formação Cobán pode ser dividida em quatro membros A, B, C, D, compreendendo pequenas camadas com intercalações de anidrites, dolomites e calcários. A formação Cambur é composta por rochas calcárias, dolomites e lutitos, com elevado numero de fosseis, os quais são a base da diferenciação destas rochas com a formação Cobán.

Estas formações localizam-se principalmente no centro e Sul dos departamentos de Petén, Quiché e Belize, no Norte e Sul de Izabal e em quase todo o departamento de Alta Verapaz e Huehuetenango, assim como numa pequenas áreas distribuídas em San Pedro e San Juan Sacatepéquez, em Tecpán e San José Poaquil, para além de se encontrarem ainda em San José Acatempa, no centro de Jutiapa, no Norte da baixa Verapaz e Chiquimulilla e no Sul de Progreso. São rochas que abrangem quase todo o período Cretácico, os quais identificam a Formação Cobán que é a unidade onde se encontram os reservatórios de petróleo no país.

– **Rochas Ígneas do Jurássico-Cretácico (Ultrabásicas)**

Unidade composta por peridotitos, gabros e dunitos, que em alguns locais se metamorfizaram chegando a formar serpentinitos. Estas rochas localizam-se numa faixa que vai de Este a Oeste do território da Guatemala, encontrando-se associadas às zonas de falha de Motagua e Polochic, no centro e Oeste de Izabal, a Este dos departamentos de Alta Verapaz e Quiché, e a Norte do departamento de Baixa Verapaz. As Serras de Santa Cruz e de Minas caracterizam esta unidade, considerando-se que estas rochas afloraram, possivelmente, nos períodos Jurássico-Cretácico.

– **Rochas Intrusivas**

Existem corpos intrusivos de rochas ígneas de diferente composição e extensão, distribuídos na parte central e Sul do país, localizados principalmente a Sul das falhas de Polochic e de Motagua. Um dos mais conhecidos é o batólito de Chiquimula, que se diz ser um corpo granítico pertencente ao Bloco Chortís, o qual se estende, principalmente, até às Honduras. Outro plutão importante é a formação granítica Rabinal, que é um granitoide inserido no Grupo Chuacús.

As rochas intrusivas são constituídas por granitos e dioritos, assim como por rochas transicionais, o que significa dizer, granodioritos. Estas rochas afloram especialmente na parte Norte dos departamentos de San Marcos, Quetzaltenango, Totonicapán, Guatemala e Chiquimula. Também se localizam a Sul de Huehuetenango, Sololá, Zacapa e Cobán; e na parte oriental de Zacapa e Baixa Verapaz. É suposto que estes corpos intrusivos tenham sido formados em diferentes idades, principalmente durante o período Paleozoico e Mesozoico.

– **Sedimentos do Cretácico Superior-Terciário Inferior**

Esta unidade corresponde aos sedimentos clásticos marinhos do Grupo Verapaz, o qual inclui as formações Sepur, Chemal e Lacandón. Estas rochas estão distribuídas de Este a Oeste do território da Guatemala, encontrando-se a Noreste de Huehuetenango, a Norte de Quiché, Cobán e Izabal; assim como a Sul de Petén e Belize. A idade atribuída a estas rochas sedimentares é do Cretácico Superior-Terciário Inferior.

– **Sedimentos Marinhos do Terciário Inferior**

Unidade correspondente ao Grupo Petén, que compreende as formações Cambio, Reforma, Toledo, Santa Amélia e Buena Vista. Estes sedimentos (arenitos, lutitos, carbonatos), encontram-se dispersos no departamento de Petén, principalmente no centro e a Nordeste, introduzindo-se em partes do território de Belize. Localiza-se também uma pequena área a Norte de Cobán nas margens do Rio Negro ou Chixoy. A sua idade é do Terciário inferior, especificamente do Paleoceno e Eoceno.

– **Formação Subinal (Terciário Médio)**

Litologicamente compreende espessas séries de conglomerados, arenitos e lutitos. Estas rochas afloram na sua maioria, a Oriente e Sul do departamento de Chiquimula e numas pequenas áreas a Norte e Nordeste de Jalapa, pelo que estas

rochas sedimentares estão circunscritas à região oriental do país. A idade, com base em relações estratigráficas, é atribuída por alguns autores ao Terciário médio e por outros ao Paleógeno.

– **Calcários e Lutitos da Formação Rio Dulce (Terciário Médio)**

Existem sedimentos calcários e lutitos, que afloram unicamente numa pequena área que se localiza a Nordeste do departamento de Izabal. São de idade do Terciário médio, especificamente do Oligocénico ao Miocénico.

– **Depósitos Continentais (Terciário Médio-Superior)**

Estes depósitos localizam-se a Norte de Belize e Sudoeste de Petén, assim como em distintas zonas do departamento de Izabal, onde se pode distinguir a Formação Armas, composta de argilas vermelhas e lutitos, com algumas camadas superiores de arenitos. A idade atribuída aos sedimentos é do Terciário médio-superior.

– **Depósitos Marinhos (Terciário Superior-Quaternário Inferior)**

Unidade que corresponde à Formação Herrería, composta principalmente por argilitos, limonites, margas e arenitos (com conglomerados) pouco consolidadas, que se localizam na Baía de Amatique e Livingston, Izabal. A idade destes depósitos marinhos é atribuída ao Pliocénico-Pleistocénico.

– **Rochas Vulcânicas do Terciário**

São as rochas ígneas que formam a maior parte do cinturão vulcânico, e que compreendem lavas basálticas, andesíticas, riolitos, dacitos, tobas (ignimbritos) e lahares. Estas rochas estendem-se de ocidente a oriente, encontrando-se nos departamentos de San Marcos, Quetzaltenango, Totonicampán, Sololá, Quiché, Chimaltenango, Sacatepéquez, Guatemala, Santa Rosa, Jalapa, Jutiapa e Chiquimula. Estas rochas são o produto do vulcanismo mundial que teve lugar no Plioceno.

– **Rochas Vulcânicas do Quaternário**

Esta unidade de rochas ígneas podem-se separar das anteriores, já que a sua formação se deve ao aparecimento da cadeia vulcânica durante o período Quaternário, o que significa que são rochas vulcânicas mais recentes, formadas por

andesitos, basaltos, riólitos, lahares e tobas vulcânicas, que se estendem de Este a Oeste na faixa central-Sul do país.

Estas rochas afloram nas partes Norte dos departamentos de Retalhuleu, Mazatenango e Escuintla, assim como a Sul e Oeste de San Marcos, Quetzaltenango, Sololá, Chimaltenango, Sacatepéquez, Guatemala e Jutiapa. Podem-se observar também a Oeste de Santa Rosa. A idade desta unidade supõe-se ser do Pleistocénico.

– Cinzas Vulcânicas Quaternárias

Esta classe de materiais, cinzas e pomes de origem vulcânica, encontra-se principalmente no cinturão vulcânico, em particular nas zonas departamentais de San Marcos, Quetzaltenango, Sololá, Quiché, Huehuetenango, Totonicapán, Chimaltenango, Salamá, Santa Rosa, Jutiapa e Guatemala. Normalmente estes materiais estão assentes sobre aglomerados piroclásticos de vários metros de profundidade, chegando em alguns locais a ter mais de 100 metros de espessura. Existem ainda a Norte de Sacatepéquez, no centro do Progreso e a Sul de Izabal, assim como na Alta e Baixa Verapaz, e inclusive no Petén, pelo que se crê que estes materiais cobriram praticamente todo o país tendo sido erodidos em muitas partes, principalmente em regiões montanhosas, com vertentes inclinadas, como as serras da parte central da Guatemala, pelo que, por vezes, é difícil a sua localização. A idade destas rochas é do Quaternário, dando-se, como exemplos a data de deposições das cinzas do Vulcão de Pacaya.

– Aluviões Quaternários

É uma unidade heterogénea, considerada como produto da acção de deslizamentos, avalanches vulcânicas, fluxos de barro e material arrastado pela água fluvial. Este material é proveniente principalmente de maciços ígneos da cordilheira vulcânica, estando esta unidade sobreposta por capas de espessuras variáveis de cinzas e lapillis, assim como de material aluvial.

A maior concentração de aluviões quaternários, encontra-se na parte Sul do país, ao largo de toda a franja costeira do Oceano Pacífico, nos departamentos de San Marcos, Retalhuleu, Mazatenango, Escuintla, Santa Rosa e Jutiapa. Localiza-se também a Noroeste e Nordeste da região do Petén, assim como nas margens do Rio Motagua e do lago Izabal. Existem zonas de menor concentração, como as localizadas a Oeste de Zacapa e a Sul de Jalapa e Chiquimula.

3.2 GEOMORFOLOGIA, TEMPERATURA E PLUVIOSIDADE

Como já referido, cerca de 60% do território da Guatemala é formado por zonas montanhosas. As diferentes zonas ecológicas variam desde o nível do mar até 4220 msnm no ponto mais elevado, com precipitação que varia de uma zona à outra desde 400 até aproximadamente 4000 mm anuais.

Devido ao seu relevo o clima da Guatemala é extremamente variável e regista regimes de ventos húmidos que provêm do mar das Caraíbas (ventos alísios) e do oceano Pacífico. O território da Guatemala encontra-se dividido em 6 regiões climáticas, a seguir descritas:

- **Planícies do Norte:** Compreende as planícies de Petén e da região norte dos departamentos de Huehuetenango, Quiché, Alta Verapaz e Izabal. As elevações oscilam entre 0 e 300 msnm, com registos de temperatura que variam entre os 20 e 30° C;
- **Facha transversal do norte:** As elevações oscilam entre os 300 e os 1400 msnm, e encontram-se definidas pelas encostas da serra Los Cuchumatanes, Chamá e a serra de Las Minas; e região norte dos departamentos Huehuetenango, Quiché, Alta Verapaz e bacia hidrográfica do rio Polochic. É uma região com muita pluviosidade e os registos mais altos da temperatura verificam-se de Junho a Outubro, sendo certo que os níveis de temperatura diminuem de acordo com a altitude;
- **Meseta e planaltos:** Esta região concentra a maior parte dos departamentos de Huehuetenango, Quiché, San Marcos, Quetzaltenango, Totonicapán, Sololá, Chimaltenango, a cidade da Guatemala, as regiões de Jalapa e das Verapazes. As montanhas desta região variam de elevações maiores ou iguais a 1400 msnm, gerando uma grande diversidade de microclimas. É de notar que esta região encontra-se densamente povoada;
- **Bocacosta:** Região estreita que atravessa transversalmente o departamento de San Marcos e Jutiapa, situada na encosta montanhosa da serra Madre, descendendo desde o planalto até a planície costeira do Pacífico. Os seus vales possuem uma altitude que varia entre os 300 e 1400 msnm. A pluviosidade atinge os níveis mais altos do país nos meses de Junho a Setembro de cada ano. A região caracteriza-se por ter um clima de alta pluviosidade e temperaturas temperadas, nem tão baixas como as do planalto, nem tão elevadas como na planície do Pacífico, por isso se denomina “Bocacosta”;
- **Planície de costa do Pacífico:** Estende-se desde o departamento de San Marcos até Jutiapa, com pequenas elevações que variam entre os 0 e 300 msnm.

Caracteriza-se por ser uma área com invernos secos e temperaturas médias a rondar os 25° C;

- **Zona Oriental:** Compreende a maior parte do departamento de Zacapa e áreas dos departamentos de El Progreso, Jalapa, Jutiapa y Chiquimula. O factor condicionante é o efeito de sombra pluviométrica que exercem as serras Chuacús e Las Minas ao largo da bacia hidrográfica do rio Motagua, as elevações são menores ou igual a 1400msnm e a temperatura oscila entre os 15 e os 35° C.

As variações térmicas acima descritas estão assinaladas no mapa de Isotérmicas de Temperatura Média Anual, à escala 1:2 000 000 (Figura 7).



FIGURA 7 - ISOMETRIAS DE TEMPERATURA MÉDIA ANUAL ENTRE 1925 - 2003
FONTE: (DEPARTAMENTO DE INVESTIGAÇÃO E SERVIÇOS METEOROLÓGICOS DO INSTITUTO NACIONAL DE SISMOLOGIA, VULCANOLOGIA, METEOROLOGIA E HIDROLOGIA)

3.3 REGIÕES HIDROGRÁFICAS

Os sistemas montanhosos determinam duas grandes regiões hidrográficas ou vertentes, e que são: a vertente do oceano Pacífico que possui uma área de 24.016 km² e a vertentes do Atlântico com 84.873 km². Por sua vez, a **Vertente do Atlântico**, encontra-se subdividida em duas áreas e que são:

- **Vertente Caribe** - com uma extensão de 34.143 km² e dois rios que desaguam no golfo das Honduras;
- **Vertente do golfo do México** - com uma extensão de 50.730 km² e dois rios localizados na península de Yucatán.

É de realçar que a **Vertente do Pacífico** é composta por 18 bacias hidrográficas, de percursos rápidos e impetuosos, sendo de destacar a Bacia Hidrográfica do rio Suchiate (que em parte faz fronteira entre o México e a Guatemala) e a do rio La Paz (fronteira natural entre El Salvador e Guatemala). Os 10 rios que terminam no golfo das Honduras são extensos e profundos. Entre os mais importantes é de salientar os seguintes: o rio Motagua, o rio Grande e o rio Dulce, do qual faz parte o lago Izabal. Por sua vez, são de referir também os rios da vertente do golfo do México, sendo os mais importantes: o rio La Pasi3n, Chixoy ou Negro, ambos afluentes do rio Usumacinta, que é o rio mais longo e com maior caudal da América central, e que constitui a fronteira natural entre a Guatemala e o México. Também é de referir que o território da Guatemala conta com numerosos lagos e lagoas, muitos de origem vulcânica, como os famosos Atitlán e Amatitlán, os lagos Petén-Itzá e Izabal e o rio Dulce que desagua no Golfo das Honduras.

3.4 EVENTOS GEOLÓGICOS

O complexo ambiente geológico da Guatemala é fortemente influenciado pelo vulcanismo e pela sua tectónica ativa que, em conjunto com as chuvas tropicais e furações (realidades naturais deste país) estão na origem de diversos movimentos de massa.

Na Tabela 1 estão indicados os registos de movimentos de massa, verificados na Guatemala no período de tempo compreendido entre Maio de 2000 e Setembro de 2010. Estes movimentos foram devido a vários acidentes geológicos, fenómenos vulcânicos e sísmicos. Faz-se igualmente o registo das perdas de vidas humanas.

TABELA 1 - PRINCIPAIS OCORRÊNCIAS DE MOVIMENTOS DE MASSAS NA GUATEMALA (2000-2010)
FONTE: (GALICIA & REQUENA, INFORMACION TÉCNICO-CIENTÍFICA PARA REDUCIR LOS RIESGOS A DESASTRES)

LOCALIDADE	DATA	CONSEQUÊNCIAS
Senahu, Alta Verapaz	Maio, 2000	13 Pessoas falecidas
Ciudad vieja Sacatepéquez	Junho, 2002	15 Casas afectadas
Finca El Provenir, Sololá	Setembro, 2002	24 Pessoas falecidas
Aldeia Chin, San Marcos	Abril, 2003	22 Pessoas falecidas
Panadaj de Santiago Atitlan, Sololá	Outubro, 2005	80 Pessoas falecidas
Aldeia Los Chorros, San Cristobal	Janeiro, 2009	38 Pessoas falecidas
Estrada Interamericana	Setembro, 2010	28 Pessoas falecidas

A maioria destes acidentes ocorreu sobre forma de deslizamentos de lodo ou escombros, rotacionais, translacionais ou com queda de rochas. Por sua vez, os furacões são factores não geológicos que quase sempre estão na base da ocorrência de acidentes graves, provocando também depressões e tempestades tropicais. Quando ocorrem, estes fenómenos naturais, acabam por ser determinantes na destruição/erosão do relevo mais vulnerável, como foi o verificado com os casos do furacão Stan, em 2005, e do Agatha, em 2010.

Segundo os dados da CONRED, nos últimos 3 anos houve um aumento de acontecimentos geológicos, conforme se mostra no gráfico da Figura 8.

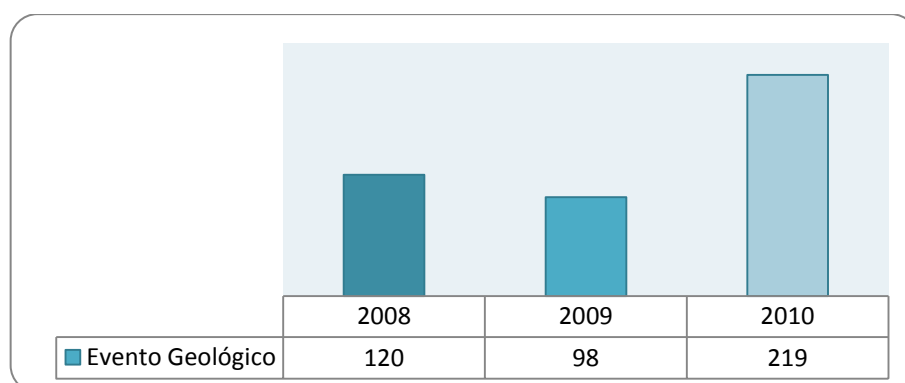


FIGURA 8 - ACONTECIMENTOS GEOLÓGICOS NA GUATEMALA NOS ÚLTIMOS 3 ANOS
FONTE: (SÁNCHEZ, 2010).

Do global dos acidentes naturais registados na Guatemala nos últimos três anos (2008-2010), 7% foram acontecimentos geológicos (2008), 21% em 2009 e 5% no ano de 2010 (Figura 9).

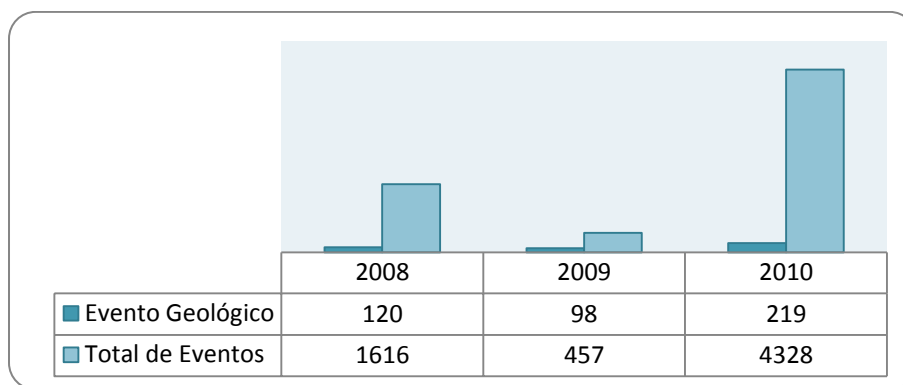


FIGURA 9 - EVENTOS GEOLÓGICOS E TOTAL DE EVENTOS NOS ÚLTIMOS 3 ANOS
FONTE: (SÁNCHEZ, 2010).

As estatísticas da Guatemala referem que nos últimos 3 anos (2008-2010), 135 pessoas faleceram devido a acidentes de origem geológica. Indicam ainda que até Outubro de 2010 tinham morrido 85 pessoas, devido a acidentes desta natureza, sendo que estas mortes correspondem a 21% do total de pessoas falecidas em acidentes geológicos, como se pode observar pelo gráfico da Figura 10. Considerando o ano de 2010 podemos constatar que, embora os acidentes geológicos só representem 5% do total de acidentes ocorridos, eles são no entanto, responsáveis por 21% do total de mortes ocorridas. Este facto releva a importância que os movimentos de massa assumem no contexto de proteção civil Guatemalteca.

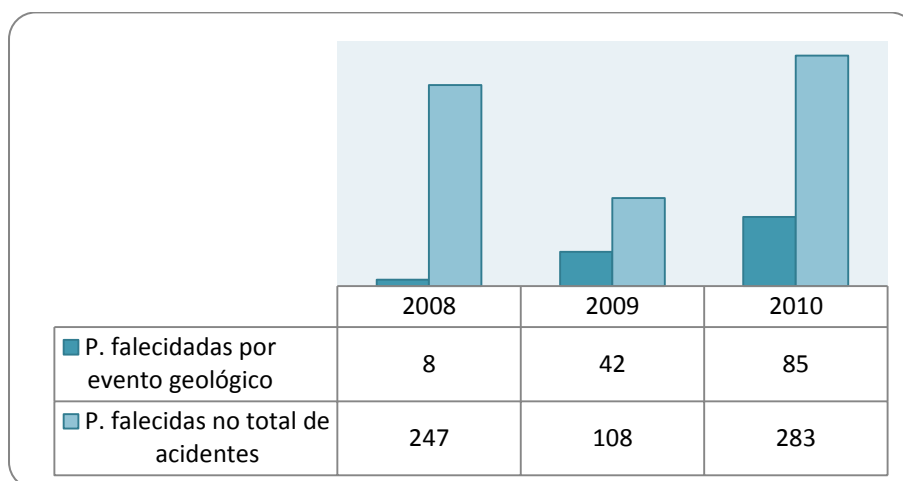


FIGURA 10 - PESSOAS FALECIDAS POR EVENTO GEOLÓGICO E PESSOAS FALECIAS NO TOTAL DE ACIDENTES
FONTE: (SÁNCHEZ, 2010).

No gráfico da Figura 11 apresentam-se os registos totais dos movimentos de massa, de sismos e de vulcanismo, ocorridos nos últimos 3 anos (2008-2010). Constata-se também

que o maior número de acidentes se verifica com os movimentos de massa, representando estes cerca de 74% do total de registos dos eventos geológicos.

É importante notar que, na Guatemala, à maioria dos eventos referidos estão associados fenómenos hidrometeorológicos, por se tratar de um território de clima tropical, possuidor de zonas montanhosas e de elevada pluviosidade.

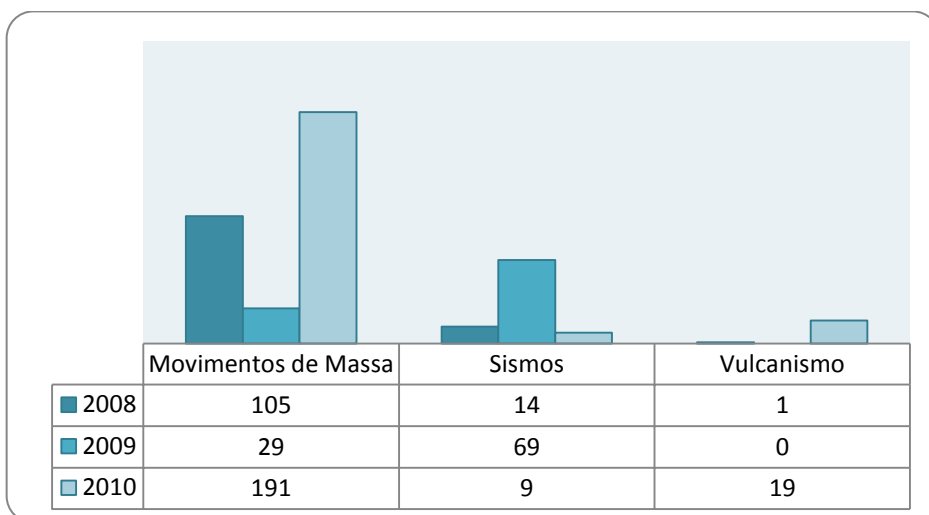


FIGURA 11 – EVENTOS GEOLÓGICOS - NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA, SISMOS E VULCANISMO EM 2008-2010 FONTE: (SÁNCHEZ, 2010).

Com efeito, os movimentos de massa são, sem dúvida, os acontecimentos que mais consequências provocam e mais vezes ocorrem (Figura 11). Das 572 pessoas que perderam a vida devido a acidentes de natureza geológicas nos últimos 3 anos (2008-2010), 325 morreram devido a movimentos de massa (Figura 12).

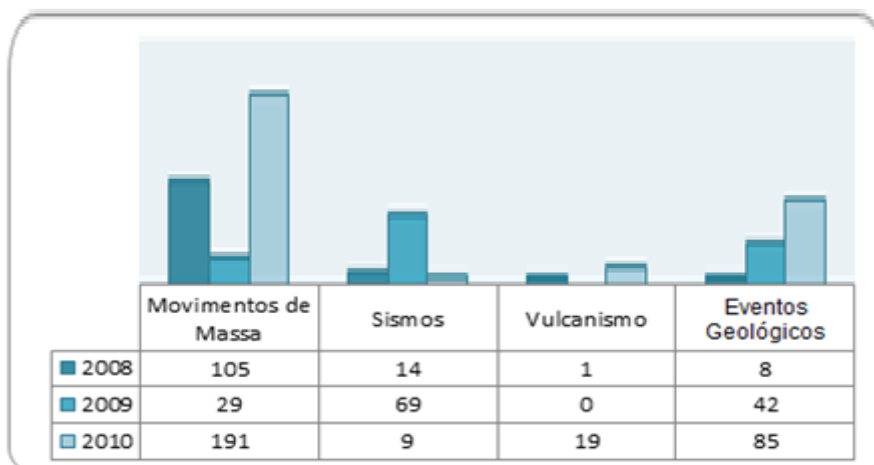


FIGURA 12 – REGISTOS DAS PESSOAS FALECIDAS POR MOVIMENTO DE MASSA, SISMO, VULCANISMO E SOMA GLOBAL – 2008-2010 FONTE: (SÁNCHEZ, 2010).

No decorrer do ano de 2010, o maior número de mortes (38 pessoas falecidas) em desastres geológicos, do tipo movimento de massa, foi devido a 2 acidentes verificados no mesmo dia e em dois pontos distanciados de 89 km da mesma estrada (estrada Interamericana), ambos associados a um fenómeno hidrometeorológico.

Com efeito e segundo os dados oficiais, estas duas ocorrências foram do tipo deslizamento de terra e do tipo desmoronamento. A primeira verificou-se no quilómetro 83 da estrada Interamericana (04/09/2010), aonde faleceram 12 pessoas, enquanto a segunda sucedeu no quilómetro 172 da mesma estrada (04/09/2010) e provocou a morte de 26 pessoas.

Como se pode observar no gráfico da Figura 13, nos anos 2008-2010, os eventos geológicos do tipo movimentos de massa afectaram 26.488 pessoas e originaram a retirada de 6.254 pessoas, sendo que desta população foi necessário realojar cerca de 3.117 pessoas.

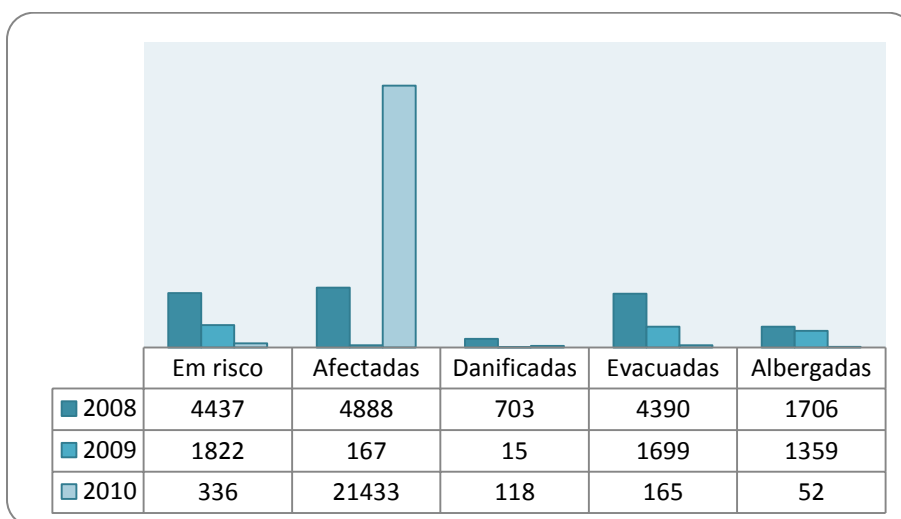


FIGURA 13 – NÚMERO DE PESSOAS AFECTADAS POR EVENTOS GEOLÓGICOS 2008-2010

FONTE: (SÁNCHEZ, 2010).

4

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA

A área de estudo, definida para a presente dissertação, é a que corresponde à Bacia Hidrográfica de Suchiate (adiante designada por BHS). É de referir que o nome Suchiate deriva de uma palavra do dialecto nahuatl “Xochiatl”, sendo que “Xochiatl” significa “água de flores”.

A BHS situa-se a noroeste do território da Guatemala, na região do departamento de San Marcos. A bacia é naturalmente atravessada pelo rio Suchiate, cuja vertente é direccionada para o oceano Pacífico e localiza-se nas proximidades do vulcão Tacana e Tajumulco, fronteira entre a Guatemala e o México. Tem uma extensão aproximada de 1.400 km², em que 76% (cerca de 1.060 km²) pertence ao território da Guatemala, principalmente a zona média e alta da bacia, sendo os restantes 24% pertencentes ao México. A costa da BHS é constituída por uma facha estreita de terra que desce desde a fronteira do México (rio Suchiate) até ao rio Naranjo, a sudoeste. A BHS encontra-se limitada a Norte pelas Terras Vulcânicas da Bocacosta, a Este pelas terras altas vulcânicas e a Sul pelo oceano Pacífico.

4.2 GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

A BHS é composta, essencialmente, por rochas vulcânicas do Terciário e Quaternário. Os fluxos de riólitos, tobas, basaltos e pomes constituem as suas unidades principais e são a manifestação da actividade do vulcão de Tajumulco. Os depósitos mais recentes são sedimentos derivados das rochas acima referidas, erodidas pela força das águas fluviais ou da actividade vulcânica (fluxos de escombros ou de lodos).

A geologia e a geomorfologia influem, em maior ou menor grau, na geração de diversos

eventos de movimentos de massa. Entre os diversos factores geomorfológicos, contam-se com o tipo de depósito e de material que os compõe, a sua diversidade, plasticidade, humidade, permeabilidade, a litologia das rochas, a sua estrutura, estado de alteração e meteorização, entre outros.

O tipo de depósito condiciona certas características e o seu comportamento físico, como por exemplo, os depósitos vulcanoclásticos, glaciares, escombros de base de vertente, coluviais e de antigos fluxos de detritos, os quais são todos susceptíveis a serem movimentados e/ou removimentados, já que são materiais permeáveis, onde a água se infiltra facilmente, superando desta forma a sua capacidade de infiltração, causando uma saturação rápida e facilitando o escoamento rápido da água neste tipo de material saturado (Hauser, A., 1997). De uma forma geral, podemos dizer que quando estamos em presença de materiais soltos, onde se incluem também os depósitos de antigos deslizamentos e/ou desprendimento de vertentes, os tipos de movimento são classificados de ruptura lenta ou solifluxão (Hauser, A., 1993). Por outro lado, em materiais menos permeáveis, como os de grão fino, densos, argilosos e rochosos com escassas fracturas, o escoamento de água superficial é relativamente mais rápido devido à sua pequena capacidade de infiltração e a menor rugosidade das suas características (Jacoby, 2001). É o caso que se verifica com os fluxos da faixa vulcânica da Guatemala, principalmente na região da bacia hidrográfica de Suchiate, aonde afloram os depósitos vulcânicos.

A composição volumétrica do material adquire relevância ao ser determinante nas propriedades de resistência do solo e da sua estabilidade de vertente. A plasticidade e humidade de um solo influenciam directamente o grau de coesão aparente do material. Se o solo fino tem alta coesão (como é o caso das argilas), a presença de níveis de pouca espessura poderá gerar superfícies potenciais de deslizamento para o material que o sobrepõe. No entanto, se se tratar de uma camada de solo arenoso, esta apresenta uma certa coesão, dependendo as suas propriedades de resistência da quantidade de humidade.

Para este trabalho consideramos os elementos principais de geologia da BHS, os quais foram agrupados nos principais do tipo de rochas, de acordo com a classificação apresentada na Tabela 2.

TABELA 2 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DE SUCHIATE
FONTE (GALICIA, G.; REQUENA, J., 2010)

ESTRATIGRAFIA	GEOLOGIA
Rochas ígneas e metamórficas do terciário	Rochas vulcânicas, predominantemente mio-pliocénico, inclui tobas, camadas de lava, material originado por movimentos lahárico e sedimentos vulcânicos.
Rochas ígneas e metamórficas do quaternário	Rocha vulcânica. Inclui camadas de lava, material proveniente de fluxos lahárico, tobas e edifícios vulcânicos.
Rochas ígneas e metamórficas do terciário	Rochas plutónicas. Inclui granitos e dioritos de idade pre-pérmico, cretácico e terciário.
Rochas ígneas e metamórficas do paleozóico	Rochas metamórficas, compostas por filitos, esquistoscloritos e granatíferos, esquistos e gneisses de quartzo-mica-feldespato, mármore e migmatitos.
Rochas ígneas e metamórficas do quaternário	Rochas vulcânicas, compostas por conglomerados e camadas espessas de cinzas pomes de origem diversa.
Rochas sedimentares pertencentes a aluviões do quaternário	Rochas sedimentares

De uma forma mais detalhada, pode-se dizer que a BHS se divide em dois grandes grupos geomorfológicos, e que são:

- **Depósitos detríticos clásticos:** São depósitos de granulometria grossa, gravo-arenosa com matriz limo-argilosa. Topograficamente formam planícies de inundação ligeiramente onduladas com um relevo suave e de pouca pendente. São atravessados por pequenos e esporádicos fluxos de água, que variam segundo a quantidade de água precipitada. Estes depósitos encontram-se na base das quebradas, distribuindo-se de maneira radial. A principal representação desta unidade corresponde aos depósitos detriticosclásticos da encosta principal do cume do vulcão Tacumulco, atingindo a região a poente da bacia hidrográfica. A esta unidade, juntam-se os depósitos das diferentes encostas que descem a cordilheira e que se encontra nos arredores da zona de estudo, estendendo-se até junto dos

depósitos dos cones aluviais do rio Suchiate.

- **Depósitos aluviais, fluviais e de antiga remoção em massa intercalados:** Estes depósitos são compostos por rochas ígneas e metamórficas de origem quaternária e possuem intercalações de depósitos aluviais, fluviais e de remoção em massa. São depósitos que se encontram relativamente estáveis. Granulometricamente são depósitos gavro-arenosos com alguns blocos que em alguns casos chegam a medir 1m de diâmetro. Apresenta ainda como um material arenoso fino de cor (verde, acinzentada, mel), com uma quantidade menor a 2% de solo limoso. O material é composto em geral por partículas arredondadas, de composição vulcânica (pomes) proveniente de rochas que pertencem à formação com aluviões e planícies aluviaes, a depósitos detríticos clásticos ou com origem em montanhas vulcânicas e vulcões.

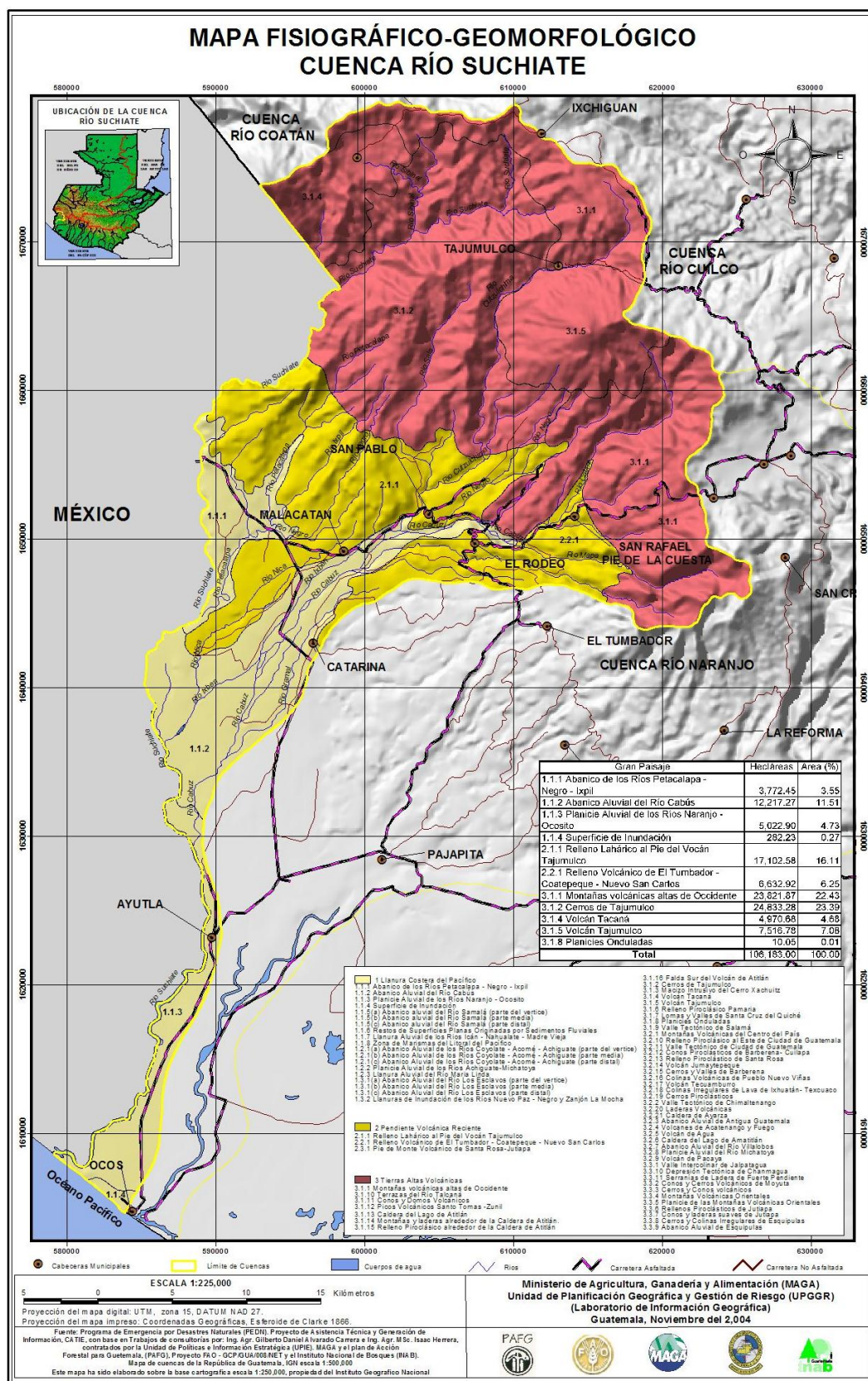


FIGURA 14 – MAPA FISIOGRAFICO E GEOMORFOLÓGICO DA BACIA HIDROGRÁFICA DE SUCHIATE
FONTE: (LABORATORIO DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA).

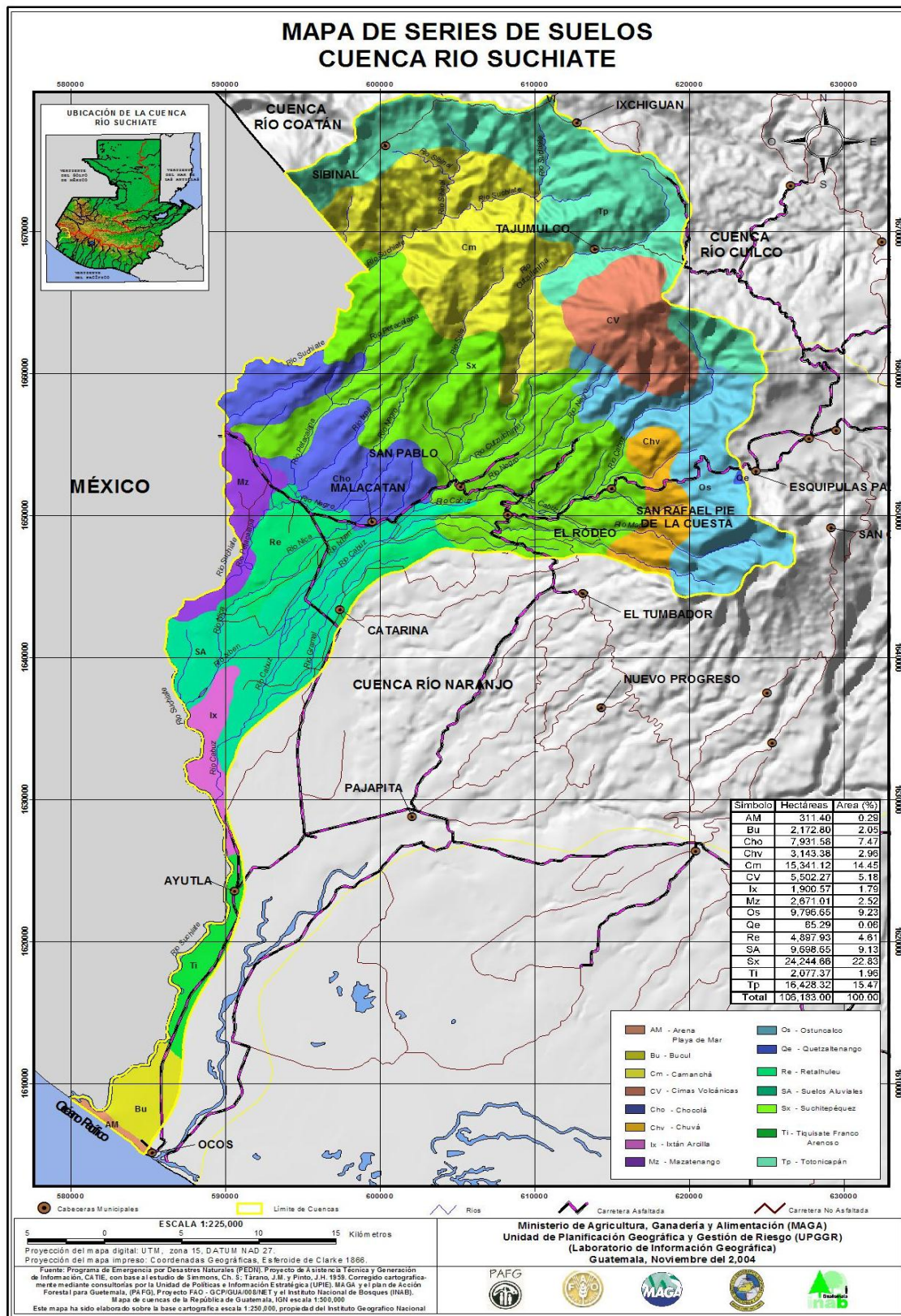


FIGURA 15 - MAPA DAS SERIES DE SOLOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DE SUCHIATE
 FONTE: (LABORATORIO DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA).

4.3 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS

As principais características morfométricas da BHS são:

Características lineares:

- Perímetro de 79,3 km, um comprimento de canal principal de 65,4 km; comprimento médio de correntes de 9,0 km;
- Raio de comprimento médio de 1,9 km; longitude acumulada de correntes de 449.4km.

Características superficiais:

- Área de 1061,8 km²;
- Relação de forma 0,25;
- Relação circular 0,23;
- Índice de compactidade 2,08;
- Densidade de drenagem 0,42 (km/km²);
- Frequência de correntes 0,047 (nº correntes/km²).

Características do relevo:

- Inclinação média 348,9 m/km. Inclinação média do canal principal 4.4%;
- Elevação média 1.400 m;
- Coeficiente de relevo $1,14 \times 10^{-03}$ (Rh);
- Coeficiente de robustez 1,79 (Rr).

Bacia Hidrográfica de Suchiate, Guatemala

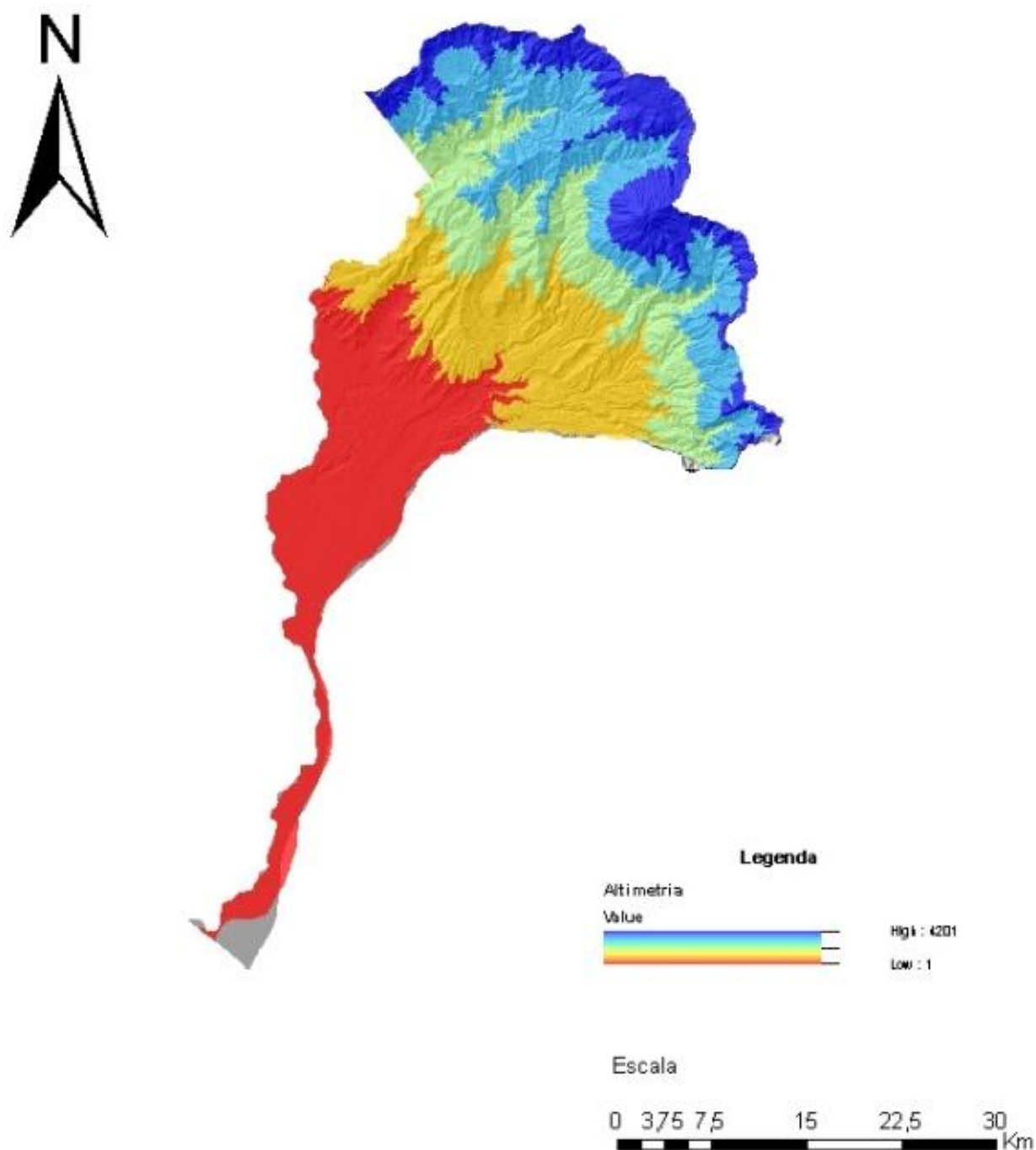


FIGURA 16 - ALTIMETRIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DE SUCHIATE.

5

TIPOLOGIA DOS MOVIMENTOS DE MASSA

Este capítulo tem como objectivo apresentar alguns conceitos e metodologias que possam servir para a avaliação dos fenómenos associados aos movimentos gravitacionais de massa, os quais, como agentes actuates na evolução das vertentes, apresentam sempre várias implicações quer de natureza económica quer nos problemas sociais resultantes dos processos de risco.

Os distintos tipos de eventos de remoção de massa podem ocorrer por processos erosivos muito activos, por dinamismo tectónico activo ou por forte pluviosidade. Os movimentos de massa têm uma característica descendente, já que são fundamentalmente controlados pela gravidade (Cruden D. M., 1991). Geralmente estes fenómenos acontecem quando a força da gravidade que afecta as partículas do maciço é maior que a força de atrito que as mantém fixa ao maciço. Na verdade, a gravidade por si só não provoca qualquer alteração na topografia de determinada região. Com efeito, é da associação entre os processos exógenos que assolam a litosfera terrestre e as forças internas que actuam sobre ela, (sismos, vulcões, etc.) que isoladas ou em conjunto com a pluviosidade, reúnem as condições necessárias e suficientes para que ocorram os movimentos de massas.

Da associação entre distintas variáveis, podem surgir diferentes movimentos de massa, os quais serão caracterizados e classificados conforme as características do movimento e a quantidade de material removido.

Como já referido, os movimentos de massa são fenómenos frequentes em países de clima tropical com zonas montanhosas e de elevado índice de pluviosidade, como é o caso da Guatemala. A elevada ocorrência deste tipo acontecimentos leva a que os movimentos de massa sejam classificados como uma das ameaças mais comuns e mais importantes neste país. Felizmente que, em muito dos casos, a ocorrência de deslizamentos, estes não

implicam o acontecimento de catástrofes, devido à baixa densidade populacional nos locais onde ocorrem.

Como assinalado anteriormente, os movimentos de massa ocorrem, em parte, quando estes já não são capazes de resistir à força da gravidade, isto é, sempre que a força motriz da gravidade excede a resistência existente na fricção dos materiais da vertente. Esta diminuição de atrito pode resultar de causas internas ou externas. Os factores internos normalmente resultam da alteração nas propriedades físicas ou químicas do material (rocha ou solo) ou da alteração do seu conteúdo de água. As causas externas que originam o aumento da tensão tangencial envolvem usualmente alguma forma de distúrbio que tanto pode ser de causa natural ou induzida pelo homem. A susceptibilidade de um local a um fenómeno de movimento de massa depende principalmente das actividades antrópicas, factores como o uso da terra, a desflorestação, a gestão de águas a nível local, a existência de águas subterrâneas, a construção de infra-estruturas (por exemplo: vias de comunicação, canalizações, etc.) e outros sistemas, como por exemplo, construções de edifícios. Os factores climáticos, não só os actuais, como também os históricos, provocam processos de deterioração do terreno produzindo alteração nas condições de equilíbrio de um dado terreno.

Com efeito, os movimentos de massa implicam sempre a deslocação de vários tipos de material, como já referido, e que normalmente são definidos como processos de movimentação, lenta ou rápida, de um determinado volume de solo, rocha. Estes movimentos de diferentes proporções, segundo a quantidade dos materiais deslocados, são desencadeados por um agente (mecanismo de ruptura) ou por uma série de factores desencadeantes. Neste contexto, os movimentos de massa foram classificados nas seguintes categorias (Hauser, A., 1993) (Cruden D. M., 1991):

- Quedas;
- Desmoronamentos;
- Deslizamentos (rotacionais ou translacionais);
- Fluxos;
- Rolamentos;
- Extensões laterais.

Esta classificação não considera diversos factores, como por exemplo, os tipos de materiais envolvidos (solo ou rocha), o mecanismo de ruptura e o grau de saturação que atingem os materiais. Estes factores, em conjunto com as características geológicas, geotécnicas e geomorfológicas envolventes, condicionam potencialmente a ocorrência de movimentos de massas, assim como as velocidades destes e os volumes dos materiais deslocados. No entanto, são frequentes os processos combinados de rocha, terra e água, como por exemplo os movimentos do tipo fluxos (Scott, et.al.,2001).

Existe no entanto uma série de factores naturais condicionantes e responsáveis pelo desenvolvimento deste tipo de acontecimentos, como é o caso da actividade sísmica, que provoca grandes desmoronamentos e quedas, assim como, a pluviosidade intensa que gera, por vezes, grandes fluxos e deslizamentos. Ambos os factores são capazes de desencadear outros tipos de movimentos de massas.

Podem igualmente ser registados casos de eventos desencadeantes, devido a outras acções da natureza, tais como os efeitos de arrastamento por cheias de rios, os quais causam muitas vezes instabilidade num determinado talude ou mesmo casos de erosão nas encostas. Dentro dos eventos associados que se podem converter em desencadeantes, é importante mencionar a relação entre a realização de escavações ou movimentações de terras, a ruptura de canalizações, a gestão inadequada de águas, a pressão devido a sobrecargas em zonas inadequadas (construção de um edifício numa encosta por exemplo), a colocação de enchimentos de antigos deslizamentos sem a devida compactação e os cuidados a ter nos projectos de engenharia, o desvio de determinadas linhas de água para o seu escoamento, entre outros.

Dentro deste âmbito, consideramos importante introduzir, neste capítulo as noções de risco, ameaça, vulnerabilidade, deslizamento e suscetibilidade, que são factuais presentes em muitas situações de movimentos de massa que ocorrem em encostas, vertentes ou taludes.

Risco - Pode ser definido como a interação entre a ameaça e o perigo, pois pessoas, edifícios, estradas etc., estão expostos à ação de ambos, assim como o seu grau de destruição o pode demonstrar com os danos provocados. (Bonachea, 2006).

Ameaça - Probabilidade de ocorrência das consequências de um fenómeno de origem natural geralmente de carácter supressivo, de evolução rápida, de relativa severidade, e que ocorre durante um determinado período de tempo num dado lugar. Afectando desta forma na totalidade ou parte do sistema territorial exposto (Horcajada, Simancas, & Dorta, 2000).

Vulnerabilidade – Trata-se de um factor intrínseco a um indivíduo, região ou comunidade que se evidencia na sua incapacidade ou limite para suportar, assumir ou assimilar eventos naturais ou humanos e perigosas ameaças (Villamizar, 2006).

Deslizamento – O deslizamento é considerado quando estamos em presença de um movimento de massa, lento ou rápido, da superfície da crosta terrestre (rocha, solo ou areias). Um deslizamento pode ocorrer numa dada zona com um certo declive, acentuado ou não, e sucede devido a um aumento de peso ou perda de consistência dos materiais, por acções externas, ou algum outro factor desencadeante, o qual origina um desequilíbrio nas condições de estabilidade da vertente (Zêzere, 2000). Com efeito, sabemos que a forte pluviosidade, a actividade sísmica ou um evento vulcânico nas proximidades, são factores desencadeantes. Igualmente, podem ser registados casos de factores desencadeantes devido a cheias de rios, as quais causam muitas vezes instabilidade num determinado talude ou erosão nas encostas.

Suscetibilidade – Define-se como a capacidade ou potencialidade de uma unidade geológica ser afectada por um determinado processo geológico (Sepúlveda, 1998). Depende de vários factores, como seja o uso dado aos terrenos (a desflorestação, a gestão de águas na zona, a existência de águas subterrâneas, a acções antrópicas), a existência de obras em infra-estruturas próximas, a presença de canalizações e outras intervenções que alterem o meio ambiente, a influência no solo dos factores climáticos (instantâneos ou históricos), ou ainda os processos de deterioração, meteorização e erosão do terreno. Em geral, estas realidades são muitas vezes locais, regionais, ambientais, climáticas ou antrópicas e afectam quase sempre as condições de equilíbrio de um terreno com um determinado declive.

Realça-se que no presente caso de estudo, os movimentos de massas não se dão apenas por causa dos processos erosivos muito activos dos vulcões, mas sim, por causa dos processos de erosão provocados pelo homem (corte intensivo de árvores) e que, conjugados com a pluviosidade intensa, conduzem muitas vezes à ocorrência de movimentos de massa. Da conjugação entre as distintas variáveis, mencionadas anteriormente, podem surgir diferentes movimentos de massa, caracterizados e classificados de várias maneiras, conforme o objectivo que se pretende para os estudos em questão.

5.1 FACTORES CONDICIONANTES NOS MOVIMENTOS DE MASSA

Para os estudos neste âmbito, são de considerar, dentro dos parâmetros anteriormente referidos, os factores mais importantes e de informação acessível, tendo em conta a análise de suscetibilidade, que é sempre uma análise de alguma complexidade. Neste contexto, e para o presente estudo, é de referir que apenas serão analisadas as variáveis condicionantes, cuja informação foi, possível tratar, mediante a aplicação dos sistemas de análise de dados que nos foram disponíveis.

O estudo do histórico sobre os movimentos de massa ocorridos no passado é um trabalho da máxima importância, na medida em que sendo contínua a actividade humana e frequentes alterações climáticas, é possível, com base nas estatísticas, efectuar uma dada previsão de novas ocorrências e, com esta informação, realizar mapas de suscetibilidade desde que contenham atributos dos deslizamentos espacialmente distribuídos. Através da localização e classificação destes deslizamentos, podem-se estimar os factores que podem causar novos deslizamentos de massas (Carrara & Cardinalli, 1991).

Em conformidade com anteriormente explorado, assinalam se agora os principais factores que estão relacionados com os movimentos de massas:

- **Topografia:** Os movimentos de massa ocorrem com maior frequência em terrenos de inclinação média a elevada, e sem vegetação. No entanto, é preciso associar a este factor o tipo de solo e restantes condições geológicas e geotécnicas, as quais, também podem contribuir para os movimentos de massa em terrenos de baixa inclinação, pluviosidade e com vegetação. Como é óbvio, o declive é um dos mais importantes factores condicionante dos movimentos de massa.
- **Geologia:** É de todos os parâmetros o mais importante, pois permite integrar e compreender melhor o modelo global que condiciona a instabilidade das vertentes.
- **Litologia:** Variável que considera as diferentes características petrológicas do substrato geológico que influenciam o desencadear de movimentos de massa. Os tipos de rocha e a qualidade dos solos determinam, em muitos casos, a facilidade com que a superfície se deteriora por acção dos seus factores extremos (meteorização, erosão, etc.).
- **Elementos estruturais:** Determinam zonas de debilidade, e a localização/orientação das estruturas em posição favorável à instabilidade (estratos).

- **Falhas:** A atividade tectónica é um elemento que pode influenciar o desencadear de movimentos de massa. As áreas localizadas em contexto de falhas que podem estar sujeitas a este tipo de fenómeno.
- **Pluviosidade:** Os aspectos climáticos, em particular a sua intensidade, duração e acumulação de água ao longo do tempo (saturação do solo superficial), pode provocar a instabilidade do subsolo. É um factor também importante, pelo que classificar a intensidade de chuva e do estado de humidade do solo, permite considerar o potencial de um deslizamento. Através de uma análise ao teor de humidades do solo é possível localizar o nível freático e a camada eventualmente sujeita a movimentos de massas. Nestes casos, o movimento ocorre devido ao súbito aumento do peso do solo na superfície de desgaste e devido à pressão que a água exerce nos poros e sobre as falhas existentes no solo. As chuvas e a formação de correntes de água na superfície (escoamentos superficiais) favorecem os processos de erosão, os quais também podem causar a ocorrência dos movimentos de massa. As elevadas precipitações em combinação com o tipo de solo (em alguns dos casos muito alterado), levam à formação e à aceleração dos movimentos de massas devido às seguintes razões:
 - O solo superficial, normalmente com elevado teor em finos, satura-se com a quantidade de água recebida ficando mais pesado, o que favorece a instabilidade;
 - Devido ao alto teor em humidade, as propriedades do solo, como por exemplo a coesão ou a fricção, diminuem. Desta forma, aumenta a suscetibilidade ao movimento de massas.
- **Cursos de água:** indicadores de maior humidade do solo (pela proximidade) e consequentemente das áreas onde os movimentos de massas poderão ocorrer mais facilmente. As chuvas e a formação de correntes de água na superfície (escoamentos superficiais) favorecem os processos de erosão, os quais também podem causar a ocorrência dos movimentos. Devem ser estabelecidas áreas de influência em torno dos principais cursos de água.
- **Ocupação do solo:** É também uma das variáveis importantes na definição da perigosidade, uma vez que a tipologia de ocupação terá de ter em atenção alguns pormenores, como por exemplo, a existência de vegetação, a estrutura e organização no espaço, factores que podem ter uma influência decisiva na ocorrência de movimentos de massas.

- **Factor de segurança:** Existem várias definições possíveis para o factor de segurança, podendo implicar valores diferentes de segurança. Por exemplo, definir a estabilidade de um talude, em termos de um factor de segurança, é uma prática comum em engenharia. Esta variável é obtida por análise matemática de estabilidade relativa ao equilíbrio de momentos aplicados (normalmente em movimentos rotacionais) ou relativo ao equilíbrio de forças (aplicados em análises de movimentos translacionais ou rotacionais). No entanto, nem todos os factores necessários para determinar o factor de segurança, e que, em simultâneo, afectam a estabilidade de um talude, se podem quantificar para poderem ser incluídos num modelo matemático. Por este motivo, há situações nas quais a sua análise, em particular, não produz resultados satisfatórios, dadas as debilidades de um modelo necessariamente simplificado. Determinar o factor de segurança assumindo superfícies prováveis de falha permite contar com informação útil para a tomada de decisões.
- **Exposição de vertentes:** Indicador importante para alguns tipos de movimentos de vertente, na medida em que indica áreas voltadas a N/S/E ou Oeste, demonstrando maior ou menor exposição solar, relevando desta forma exposições mais propícias a estes fenómenos.

5.2 TIPOS DE MOVIMENTOS

Os movimentos de massa são classificados de acordo com o tipo de movimento e o material envolvido (Varnes, D.J., 1978). Quanto ao tipo de materiais, a partir dos quais se podem gerar os distintos tipos de eventos, estes podem ser considerados divididos em rocha ou solo; enquanto em relação ao tipo de movimentos possíveis de se gerar são normalmente consideradas: caídas ou rolamento, ou deslizamento, extensões laterais e fluxos (Ver Anexo A).

De uma forma simples, à combinação destes factores dá-se o nome ao movimento de massa, sem desvalorizar que podem existir outros eventos combinados que lhe atribua complexidade tanto ao comportamento do fenómeno como à classificação que se pretende atribuir.

TABELA 3 - CLASSIFICAÇÃO DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA (VARNES, D.J., 1978)

Tipo de Movimentos			Tipo de Material		
			Rocha	Solo (engenharia)	
				Grossoiro	Fino
Quedas			De rocha	De detritos	De terra
Desmoronamentos			De rocha	De detritos	De terra
Deslizamentos	Rotacional	Poucas unidades	Abatimento rocha	Abatimento de detritos	Abatimento de terra
			De blocos rochosos	De blocos de detritos	De blocos de terra
			De rocha	De detritos	De terra
	Translacional	Muitas unidades	De rocha	De detritos	De terra
Expansões laterais			De rocha	De detritos	De terra
Fluxos			De rocha (rastejo profundo)	De detritos	De terra
Complexos - combinação de dois ou mais dos principais tipos de movimentos de massas					

Na maioria dos casos, os movimentos de vertente são diferenciados pelos tipos de material e pelos mecanismos desencadeantes envolvidos. Existe no entanto outras formas de classificação que incorporam variáveis adicionais, tais como a velocidade do movimento, a quantidade de água, ar, ou gelo do material em movimento.

No **Anexo A** é feita uma descrição mais pormenorizada da classificação dos tipos e das características associadas aos movimentos de massa, fazendo-se também uma caracterização das principais causas que estão na origem destes movimentos.

6

VARIÁVEIS DE ESTUDO

As técnicas de análise neste tipo de estudo são normalmente divididas em duas categorias: os métodos determinísticos, nos quais a medida da segurança da vertente é feita em termos de um factor de segurança; e métodos probabilísticos, na qual a medida de segurança é feita em termos da probabilidade do risco de ocorrência de ruptura dos solos devido a diversos factores. A opção tomada neste trabalho afasta-se claramente da abordagem determinística e preconiza-se um “*model driven approach*” na qual a análise de dados resultante estará, forçosamente, na base de um qualquer modelo probabilístico de risco a desenvolver em fase posterior. Neste contexto, optou-se por se assegurar uma certa homogeneidade das variáveis, através de uma prévia codificação dos dados iniciais. O facto das variáveis em estudo serem de diferentes naturezas (quer quantitativas quer qualitativas). Implicou que a codificação, passou-se pela transformação de algumas variáveis mensuráveis em variáveis subdivididas em classes (aqui designadas por modalidades da variável), seguindo-se assim uma metodologia preconizada por Góis (Góis, J. E., 2004). Esta transformação irá permitir uma aplicação de uma variante da Análise Factorial das Correspondências, a Análise Factorial de Correspondências Binárias (adiante designada por AFCB).

As variáveis utilizadas no presente estudo foram sujeitas a um pré-tratamento estatístico, incluindo a subdivisão das variáveis nas diferentes modalidades, que passou pela construção dos respectivos histogramas de frequências.

6.1 OBTENÇÃO DOS DADOS

Como observado anteriormente, a bacia hidrográfica de Suchiate (BHS) apresenta uma grande complexidade de elementos do ponto de vista do estudo da sua geologia e geomorfologia.

Assim sendo, e neste âmbito, foram efectuados na Guatemala diversos contactos pessoais para a realização de pesquisas com vista à obtenção de resultados práticos para a elaboração deste trabalho. Dos vários caminhos concebíveis para a obtenção de resultados, foi possível, por gentileza do Professor Jaime Requena, aceder ao artigo *“Determinación de la Amenaza por deslizamientos en la cuenca de Suchiate, Guatemala”* (Galicia, G.; Requena, J., 2010). Neste elaborado documento, encontram-se referenciados 7.740 locais, segundo o Universo Transverso de Mercutor (UTM) e o North American Datum Zona 15, aonde se registaram movimentos de massa, como se representa no mapa altimétrico (Figura 17).

Com base neste completo estudo, realizou-se uma análise a toda a informação, debruçando-se a nossa análise sobre a interação entre os vários pontos de movimentos de massa e o seu meio envolvente, bem como sobre a adequação das variáveis aos requisitos necessários para o presente estudo, sendo de destacar algum trabalho de campo efectuado, e isto, como fórmula para se alcançar os objectivos fixados para este trabalho.

Bacia Hidrográfica de Suchiate, Guatemala

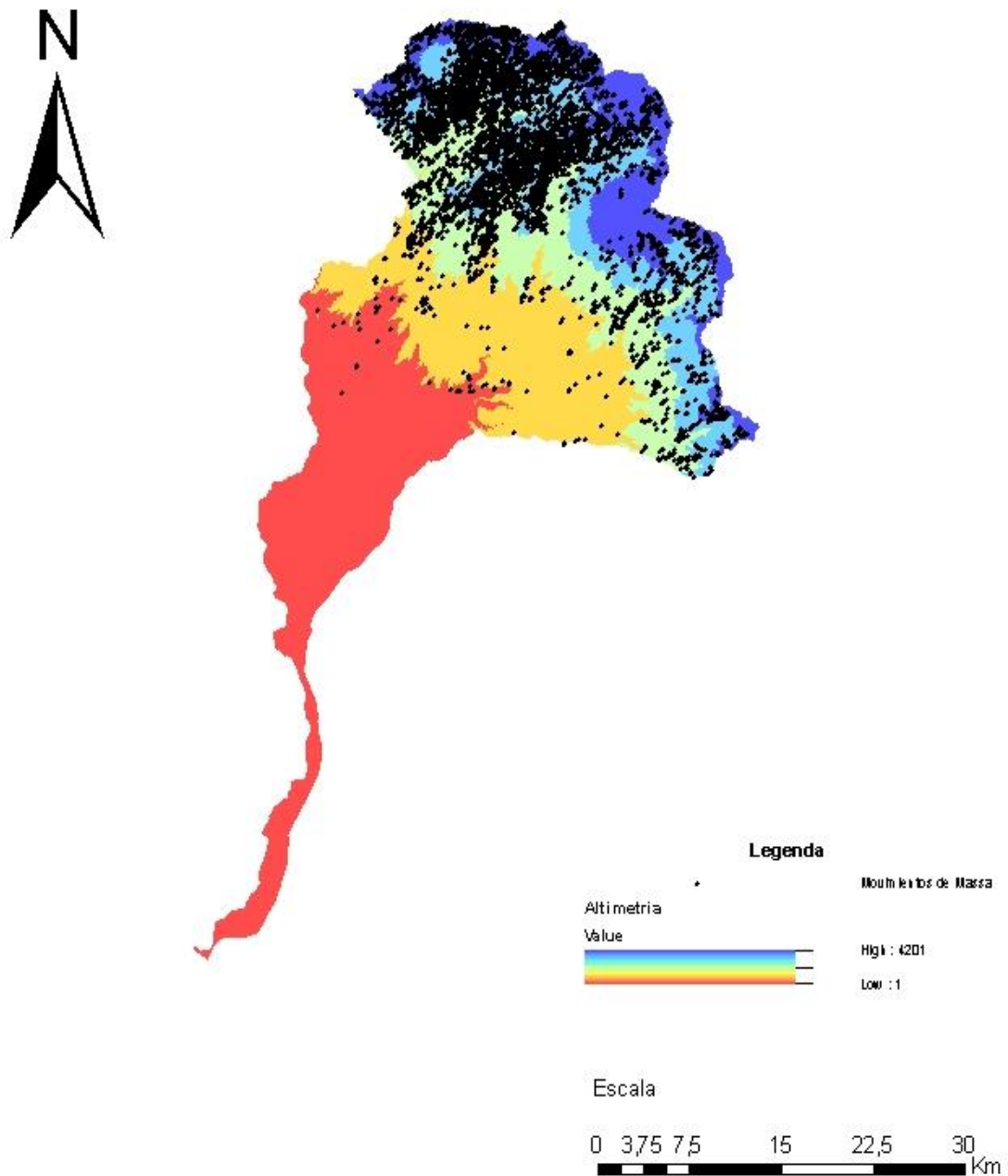


FIGURA 17 - LOCAIS DE MOVIMENTOS DE MASSA NA BACIA HIDROGRÁFICA DE SUCHIATE (PONTOS ASSINALADOS A PRETO).

6.2 VARIÁVEIS DE ESTUDO E SUA CODIFICAÇÃO

Efetuada uma análise completa a toda a informação constante do trabalho mencionado, foi possível associar, para cada um dos 7.740 locais, aonde se registaram movimentos de massas, as seguintes variáveis: **altitude; inclinação; orientação; geologia; geomorfologia; densidade de linhas de superfície (alinhamentos estruturais) e densidade de linhas de água (drenagem ou escoamento).**

Os critérios para esta primeira subdivisão das variáveis nas diferentes modalidades obedecem os seguintes pressupostos:

- A opinião dos especialistas sobre as classes mais importantes a considerar em cada variável;
- Evitar modalidades sem registos;
- Sempre que possível uma uniformidade na amplitude das modalidades.

Estabelecido para cada uma destas variáveis (entre parêntesis é indicada a respectiva codificação) foi o seguinte:

6.2.1 ALTITUDE (Z)

Foi determinada através de um modelo de elevação digital aonde se utilizaram curvas de nível, com intervalos de 10 em 10 metros. Por sua vez, o conjunto dos pontos desta variável foi agrupado em 5 intervalos, correspondendo cada intervalo a uma modalidade, de acordo com a sua altitude em relação ao nível do mar, conforme se apresenta na Tabela 4.

TABELA 4 - CODIFICAÇÃO DA VARIÁVEL ALTITUDE E RESPECTIVAS MODALIDADES

Altitude (zC)	Modalidades (metros sobre o nível do mar)
zC1	De 1 a 535
zC2	De 535 a 1223
zC3	De 1223 a 1949
zC4	De 1949 a 2650
zC5	De 2650 a 4201

6.2.2 INCLINAÇÃO (i)

As diferentes inclinações foram calculadas através do Sistema de Informação Geográfico (adiante designada por GIS) usando o método de triangulação e análise da superfície do terreno. Esta variável é um dos mais importantes factores condicionantes dos movimentos de massas, como anteriormente referido.

TABELA 5 - CODIFICAÇÃO DA VARIÁVEL INCLINAÇÃO E MODALIDADES

Inclinação (iC)	Modalidades (graus)
iC1	De 0 a 15
iC2	De 15 a 30
iC3	De 30 a 45
iC4	De 45 a 60
iC5	>60

6.2.3 ORIENTAÇÃO DAS ENCOSTAS (o)

Variável relevante para alguns tipos de movimentos de massa, na medida em que indica as áreas que estão orientadas a Norte, Sul, Este ou Oeste, algumas das quais pensam-se ser mais propícias do que as outras a estes fenómenos em estudo. Com efeito, devida à orientação geográfica é possível conhecer os possíveis caminhos que irão servir para o escoamento dos fluxos de lama vulcânica e que podem tomar direcção de zonas localizadas na parte baixa da bacia e que normalmente se encontram povoadas. Neste trabalho, as diferentes orientações foram determinadas através de um modelo digital do terreno, com base na cartografia hipsométrica (vectorial) e as curvas de nível elaboradas no GIS.

TABELA 6 - CODIFICAÇÃO DA VARIÁVEL ORIENTAÇÃO DE ENCOSTA E RESPETIVAS MODALIDADES

Orientação de encosta (oC)	Modalidade (graus)
oC1	De 0 a 55
oC2	De 55 a 144
oC3	De 144 a 211
oC4	De 211 a 276
oC5	De 276 a 360

6.2.4 GEOLOGIA (ge)

É uma variável importante que considera as diferentes características gerais do substrato geológico, isto é, os diferentes tipos de rocha, a sua descrição, a composição mineralógica e estratigráfica. A partir desta informação detalhada foi possível caracterizar as unidades geológicas (rocha ou solo) que podem influenciar o desencadear de movimentos de massa. Utilizou-se a informação pré-existente e a cartografia geológica elaborada recentemente pelo curso de Geologia do Centro Universitário do Norte da Universidade de San Carlos. A identificação desta característica foi completada pela análise de ortofotomapas e foto-interpretção.

TABELA 7 - CODIFICAÇÃO DA VARIÁVEL GEOLOGIA E RESPETIVAS MODALIDADES

Geologia (geC)	Modalidades
geC1	Rochas ígneas e Metamórficas do Terciário; Intrusivos graníticos
geC2	Rochas Ígneas e Metamórficas do Paleozóico
geC3	Rochas Ígneas e Metamórficas do Quaternário, maioritariamente rocha Pomes
geC4	Rochas Ígneas e Metamórficas do Terciário; Rochas Ígneas e Metamórficas do Quaternário; Vulcanitos (coladas, lahares, tobas)
geC5	Aluviões do Quaternário, Rochas Sedimentares

6.2.5 GEOMORFOLOGIA (gm)

As características geomorfológicas foram utilizadas para determinar as formas do terreno, identificar e caracterizar os processos erosivos e de movimentos de massa. Obtiveram-se dados referentes à morfologia e geoformas de maneira a se poderem avaliar os processos morfodinâmicos. Para esta zona específica, foram analisados dados geomorfológicos de forma a determinar a influência das unidades na suscetibilidade dos terrenos na região.

TABELA 8 - CODIFICAÇÃO DA VARIÁVEL GEOMORFOLOGIA E RESPETIVAS MODALIDADES

Geomorfologia (gmC)	Modalidades
gmC1	Planícies de inundação, planícies aluviais
gmC2	Planícies onduladas
gmC3	Cume Tajumulco, Montanhas vulcânicas e vulcões
gmC4	Leques Aluviais
gmC5	Aluviões

6.2.6 DENSIDADE DE LINHAS DE SUPERFÍCIE (LS)

A atividade tectônica é um elemento que pode influenciar o desencadear de movimentos de massa. Com efeito, as áreas localizadas em contexto de falhas podem estar mais sujeitas a este tipo de fenómenos. Por sua vez, os alinhamentos estruturais da bacia hidrográfica foram identificados e analisados através da informação obtida a partir do modelo de sombras (derivado do modelo de elevação digital), sensores remotos, fotografias aéreas, ortofotos e trabalho de campo. Neste caso, os alinhamentos coincidem na sua grande maioria com falhas e fracturas que fragilizam os maciços rochosos da área de estudo. Através do GIS foi elaborado um mapa de alinhamentos estruturais que serviu de base para determinar a densidade de linhas de superfície. Para se obter a densidade de linhas de superfície, toda a área da BHS foi dividida em quadrículas de 5 km².

TABELA 9 - CODIFICAÇÃO DA VARIÁVEL DENSIDADE DE LINHAS DE SUPERFÍCIE E RESPECTIVAS MODALIDADES

Densidade de Linhas de Superfície (IsC)	Modalidades
IsC1	De 0 a 0,106
IsC2	De 0,106 a 0,308
IsC3	De 0,308 a 0,529
IsC4	De 0,529 a 0,807
IsC5	De 0,807 a 1,286

6.2.7 DENSIDADE DE LINHAS DE ÁGUA (wl)

Como efectuado para a variável anterior, a partir de um modelo digital de elevação e com o modelo hidrológico do GIS, foram identificadas as redes de drenagem da BHS, utilizando-se para o efeito micro bacias com áreas de 5 km². A partir desta análise desenhou-se uma rede de drenagem para toda a bacia hidrográfica e através deste resultado observaram-se diferenças de comportamento em função da litologia e da topografia: dendrítico, sub-dendrítico, cruzado, canais aluviais meândricos e rectilíneos. É importante referir que uma das análises mais útil para determinar a suscetibilidade de um terreno a deslizamentos é a determinação da densidade de linhas de água (também conhecida por drenagem ou escoamento). Esta variável foi calculada usando uma função do GIS e posteriormente dividida em 5 modalidades (Tabela 10). Também se considerou que quanto maior fosse a densidade das linhas de água, maior seria a sua influência desta variável na suscetibilidade dos terrenos a consequências a deslizamentos.

TABELA 10 - CODIFICAÇÃO DA VARIÁVEL DENSIDADE DE LINHAS DE ÁGUA E RESPECTIVAS MODALIDADES

Densidade de linhas de água (wIC)	Modalidades
wIC1	De 0 a 1,065
wIC2	De 1,065 a 2,101
wIC3	De 2,101 a 3,046
wIC4	De 3,048 a 4.143
wIC5	> 4.143

Para além das codificações das variáveis e respectivas modalidades, foi efectuado para os diferentes registos e para a quase totalidade das variáveis (inclinação; geomorfologia; geologia; densidade de linhas de superfície e densidade de linhas de água, excepto portanto as respeitantes à altitude e à orientação de encosta) a associação de uma variável booleana designada de **suscetibilidade** (1 – ocorrência de movimento; 0 – ausência de movimento), como adiante se apresentará. É de notar ainda que para este estudo se considera que quanto maior for o número de movimentos registados, por área da bacia hidrográfica, maior será a sua influência na suscetibilidade dos terrenos a novos movimentos de massa.

7

ANÁLISE ESTATÍSTICA APLICADA AOS MOVIMENTOS DE MASSA

No presente estudo, os movimentos de massa relativos aos 7.740 pontos foram analisados segundo a metodologia explicitada no capítulo anterior. Numa primeira fase e na tentativa de investigar se as flutuações, mudanças e efeitos observados nos dados, poderiam ser atribuídas à variabilidade isolada de uma qualquer variável, procedem ao estudo estatístico univariado. Este princípio de trabalho é o mais adequado ao estudo de grande quantidade de informação, uma vez que é possível a utilização de meios informáticos para tratar estatisticamente todos os dados de uma forma eficiente.

Numa segunda fase, optou-se pela realização de um estudo de acordo com a metodologia preconizada na Análise Factorial de Correspondências. Esta acção teve em vista alcançar os seguintes objectivos:

- Analisar as correlações entre as diversas variáveis e a ocorrência de movimentos de massa;
- Analisar eventuais diferenças entre as zonas da bacia hidrográfica em estudo (nas suas diferentes modalidades).

É neste seguimento, que a segunda parte do tratamento estatístico da presente dissertação se insere no âmbito da Análise Multivariada de Dados, em particular a Análise Factorial de Correspondências (AFC).

Com efeito, de acordo com (Góis, J. E., 2004), sabe-se que a AFC é um método factorial de análise que permite visualizar, através de gráficos bidimensionais (planos factoriais), conseguidos à custa de uma redução na dimensionalidade dos dados de partida, não só o sistema de relações no interior de cada um dos conjuntos formados pelas variáveis (colunas da matriz) ou pelas amostras (linhas da matriz), mas também no sistema de relações

conjuntas existentes entre variáveis e amostras.

Por sua vez, a opção pela AFC, enquanto técnica de análise de dados, deveu-se também à flexibilidade que este método factorial apresenta no tratamento de matrizes de dados, cujas variáveis iniciais podem vir expressas em diferentes métricas.

7.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA APLICADA AOS MOVIMENTOS DE MASSA

Inicialmente, devido à importância que os factores condicionantes têm na origem de movimentos de massa (Tabela 11), procedeu-se a um estudo estatístico descritivo, conforme a seguir se apresenta.

As diversas variáveis foram sujeitas a um pré-tratamento estatístico, (incluindo a subdivisão nas diferentes modalidades) que passou pela construção dos respectivos histogramas de frequências conforme é apresentado no **Anexo C**. A Tabela 11 reproduz a informação inicialmente tratada nesta fase, bem como apresenta as diferentes variáveis e as respectivas codificações, assim como o número de modalidades (sub-variáveis ou categorias nas quais se dividem as variáveis), a frequência absoluta e respectiva percentagem em relação ao numero total de observações.

TABELA 11 - DIVISÃO DAS VARIÁVEIS, RESPECTIVAS MODALIDADES, CODIFICAÇÃO, FREQUÊNCIA ABSOLUTA E RELATIVA.

Variável n.º	Nome da Variável	N.º de Modalidades	Modalidades	Codificação	Frequência
1	Altitude	5	De 0 a 535	zC1	37 (0,48%)
			De 535 a 1223	zC2	193 (2,49%)
			De 1223 a 1949	zC3	1545 (19,96%)
			De 1949 a 2650	zC4	4105 (53,01%)
			De 2650 a 4201	zC5	1862 (24,06%)
2	Inclinação	5	De 0 a 15	iC1	304 (3,93%)
			De 15 a 30	iC2	2709 (35%)
			De 30 a 45	iC3	4314 (55,74%)
			De 45 a 60	iC4	407 (5,26%)
			> 60	iC5	6 (0,08%)
3	Suscetibilidade de Movimentos na Inclinação	2	Ausência de movimentos	iS1	3426 (44,26%)
			Ocorrência de movimento	iS2	4314 (55,74%)
4	Orientação de encosta	5	De 0 a 55	oC1	559 (7,22%)
			De 55 a 144	oC2	2705 (34,95%)
			De 144 a 211	oC3	2855 (36,87%)
			De 211 a 276	oC4	2131 (15,91%)
			De 276 a 360	oC5	390 (5,04%)
5	Geomorfologia	5	Planícies de inundação, planícies aluviais	gmC1	0 (0%)
			Planícies onduladas	gmC2	0 (0%)
			Cume de Tajumulco, Montanhas vulcânicas e vulcões	gmC3	7642 (98,74%)
			Leques aluviais	gmC4	15 (0,20%)
			Outros aluviões	gmC5	83 (1,07%)
6	Suscetibilidade de Movimentos na Geomorfologia	2	Ausência de movimentos	gmS1	98 (1,27%)
			Ocorrência de movimento	gmS2	7642 (98,73%)

TABELA 11 - DIVISÃO DAS VARIÁVEIS, RESPECTIVAS MODALIDADES, CODIFICAÇÃO, FREQUÊNCIA ABSOLUTA E RELATIVA (CONTINUAÇÃO).

Variável n.º	Nome da Variável	N.º de Modalidades	Modalidades	Codificação	Frequência
7	Geologia	5	Rochas Ígneas e Metamórficas, terciário; Intrusivos graníticos	geC1	3847 (49,7%)
			Rochas Ígneas e Metamórficas, Paleozóico	geC2	427 (5,52%)
			Rochas Ígneas e Metamórficas, Quaternário; Pomes	geC3	18 (0,23%)
			Rochas Ígneas e Metamórficas do Terciário; Rochas Ígneas e Metamórficas, Quaternário; Vulcânicos (coladas, lahares, tobas)	geC4	3436 (44,40%)
			Aluviões Quaternários, Rochas Sedimentares	geC5	12 (0,15%)
8	Suscetibilidade de Movimentos na Geologia	2	Ausência de movimentos	geS1	3893 (50,3%)
			Ocorrência de movimento	geS2	3847 (49,8%)
9	Densidade de linhas de superfície	5	De 0 a 0,106	lsC1	3927 (50,74%)
			De 0,106 a 0,308	lsC2	2468 (32,89%)
			De 0,31 a 0,52	lsC3	1134 (14,65%)
			De 0,53 a 0,81	lsC4	192 (2,48%)
			De 0,81 a 1,29	lsC5	19 (0,25%)
10	Suscetibilidade de Movimentos na Densidade de linhas de Superfície	2	Ausência de movimentos	lsS1	6606 (85,35%)
			Ocorrência de movimento	lsS2	1134 (14,65%)
11	Densidade de linhas de água	5	De 0 a 1,06	wlC1	1139 (14,72%)
			De 1,06 a 2,11	wlC2	6280 (81,14%)
			De 2,10 a 3,05	wlC3	313 (4,04%)
			De 3,05 a 4,14	wlC4	8 (0,10%)
			>4,14	wlC5	0 (0%)
12	Suscetibilidade de Movimentos na Densidade de Linhas de Água	2	Ausência de movimentos	wlS1	1460 (18,86%)
			Ocorrência de movimentos	wlS2	6280 (81,14%)

7.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA

A análise estatística multivariada é entendida, neste trabalho, numa perspectiva não-paramétrica, não se pressupondo qualquer tipo de distribuição teórica associada às variáveis. Esta opção metodológica enquadra-se na abordagem tradicional dos métodos factoriais nos quais se privilegia a descoberta do sistema de inter-relações multidimensionais entre o conjunto das variáveis/modalidades entre o conjunto das amostras e deste ultimo com o primeiro. Atendendo à característica e natureza de informação a tratar, a seleção da AFC, enquanto técnicas de Análise Exploratória de dados, torna-se o caminho óbvio para o tratamento estatístico a seguir.

7.3 ANÁLISE FACTORIAL DAS CORRESPONDÊNCIAS

A AFC é uma abordagem da estatística multivariada, que é utilizada para avaliar as correlações entre conjuntos vastos de dados relativamente às suas dimensões comuns, de tal forma que todas as variáveis possam ser representadas por um número mínimo de variáveis “escondidas” (fatores) com a mínima perda de informação e a máxima significância. Contudo, existindo vários métodos disponíveis para se chegar a este resultado, todos têm em comum o facto de constituírem os eixos factoriais que fazem ressaltar determinadas características de dados.

No presente estudo, o objectivo também passa por resumir a informação a partir de um grande conjunto de dados de 7 variáveis diferentes (subdivididas em 45 modalidades), pelo que o método mais adequado para este tratamento estatístico é o da **Análise Factorial das Correspondências (AFC)**.

A AFC tem como objectivo fazer a descrição das estruturas relacionais subjacentes aos dados de partida. Como refere (Pereira, H. G.; Sousa, A. J., 1988), «...o objectivo dos métodos factoriais é encontrar, com um mínimo de hipóteses à priori, uma representação aproximada do quadro de partida que garanta o máximo de conformidade geométrica com os dados...».

Com o objectivo de no futuro ser criado um modelo estatístico de previsão para a ocorrência de movimentos de massa, propõe-se identificar, através da AFC, de um conjunto alargado de variáveis potencialmente influentes, aquelas que contribuem de forma independente e significativa para condicionar os movimentos de massa.

7.4 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS EM AFC

A interpretação em AFC faz apelo a critérios topo-morfológicos de proximidade/afastamento entre as entidades projetadas nos planos fatoriais, pelo que as coordenadas variáveis/modalidades e das amostras assumem um papel importante na interpretação dos resultados obtidos.

As coordenadas das variáveis foram normalizadas de forma a se perceber quais as que mais se correlacionam e aquelas que não possuem correlação alguma. Assim sendo, as variáveis que se aproximarem mais da origem não serão suscetíveis de interpretação no eixo fatorial, uma vez que estas conduzem a coordenadas de valor baixo.

Por sua vez, as variáveis que se encontram afastadas da origem terão não só uma forte associação com o eixo factorial onde se projetam (o que legitima a interpretação) mas também uma forte associação direta com as outras variáveis que igualmente existem elevadas coordenadas no eixo fatorial e que por este fato se projetam perto uma das outras. (Figura 18).

As considerações anteriormente tecidas em relação à projeção das variáveis num dos eixos fatoriais do plano fatorial (no caso anterior o eixo horizontal) são igualmente válidas para o outro eixo do plano fatorial, isto é, mantem-se os critérios de representatividade das variáveis/modalidades sempre que o valor da coordenada for elevado. (Figura 19). Contudo, ter-se-à que considerar a taxa de explicação (cada vez mais reduzida) associado a cada um dos eixos factoriais considerado.

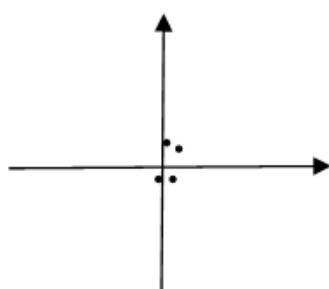


FIGURA 18 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DE NÃO REPRESENTATIVIDADE DAS VARIÁVEIS NO PLANO FATORIAL

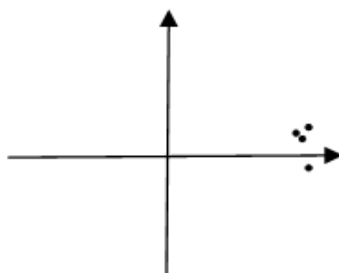


FIGURA 19 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DE RELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS

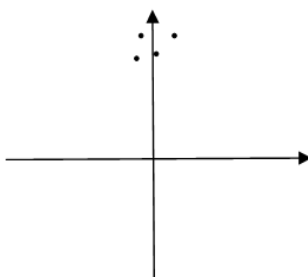


FIGURA 20 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DE RELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS

De notar ainda que as variáveis não terão necessariamente de se apresentar junto aos eixos do gráfico, podendo também haver correlação se os grupos se apresentarem obliquamente. Nesse caso, haverá contribuição dos dois eixos para a relação entre as variáveis.

Para além destes casos, poderá existir a situação em que um grupo de variáveis directamente proporcionais, resultado da combinação linear, se opõe a outro grupo de variáveis directamente proporcionais entre si. Neste caso, estes dois grupos irão estar fortemente correlacionadas mas de forma inversa (Figura 21).

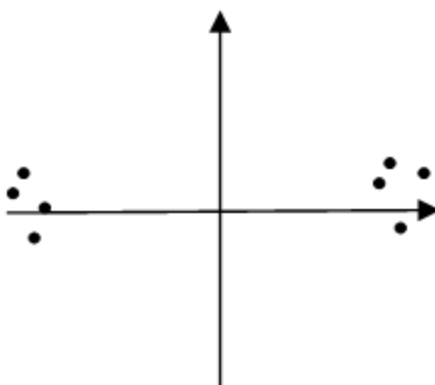


FIGURA 21 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DE RELAÇÃO INVERSA ENTRE AS VARIÁVEIS

7.5 APLICAÇÃO DA AFC AOS DADOS EM ESTUDO

Embora uma das vantagens na aplicação da AFC resida na possibilidade de se visualizarem simultaneamente as estruturas entre as modalidades e as amostras, o uso que dela faremos neste trabalho resumir-se-á à descrição da estrutura relacional entre modalidades. Face ao elevado número de registos, (7740 locais analisados) qualquer tentativa de projetar as amostras nos planos fatoriais, resultaria em representação gráfica ilegíveis.

A AFCB é um modelo que teve os seus primeiros desenvolvimentos nos trabalhos de Benzécri (1973) e por Lebart (1975), e constitui uma extensão da AFC, cujos objectivos iniciais se destinavam ao tratamento de questionários. Este método, que privilegia as formulações dos dados de partida em quadros disjuntivos completos, considera simultaneamente um conjunto multidimensional de variáveis tendo em conta o sistema de interdependências entre as diferentes modalidades de todas as variáveis em estudo.

Assim sendo, considerando que a matriz de dados inicial, do nosso estudo, contém variáveis de diferentes naturezas (recorda-se as métricas em que se exprimem, por exemplo, a variável *altitude*, medida numa escala intervalar ou, por exemplo, a variável *geologia*, medida numa escala nominal), foi necessário assegurar a homogeneidade das variáveis através de uma prévia codificação dos dados de partida. Esta codificação, que passou pela transformação de algumas variáveis mensuráveis em variáveis ordinais subdivididas em várias classes (aqui designadas por modalidades da variável).

Interessa realçar que o processo final de codificação das variáveis/modalidades, tendo sido um processo dinâmico, implicou a análise de resultados obtidos por diversas pré-codificações ensaiadas em fases preparatórias e que serviram de teste à aplicação da AFCB aos dados em estudo. Como se pode depreender do que atrás se refere e como se poderá concluir da leitura adiante do texto desta tese, houve a necessidade de proceder a diversas recodificações das variáveis por forma a que numa perspetiva de retroação dinâmica na formatação da informação. A subdivisão final das variáveis nas diferentes modalidades é apresentada na Tabela 12.

TABELA 12 - SUBDIVISÃO DAS VARIÁVEIS NAS DIFERENTES MODALIDADES, CODIFICAÇÃO, FREQUÊNCIA ABSOLUTA E RELATIVA

Variável n.º	Variável	N.º de Modalidades	Modalidades	Codificação	Frequência
1	Altitude	3	De 1 a 1949	zC1	1775 (22,9%)
			De 1949 a 2650	zC2	4103 (53%)
			De 2650 a 4201	zC3	1862 (24,1%)
2	Inclinação	2	De 0 a 30	iC1	3013 (38,93%)
			De 30 a >60	iC2	4727 (61,07%)
3	Suscetibilidade de Movimentos na Inclinação	2	Ausência de movimentos	iS1	3426 (44,26%)
			Ocorrência de movimento	iS2	4314 (55,74%)
4	Orientação de encosta	3	De 0 a 144	oC1	3264 (42,17%)
			De 144 a 211	oC2	2855 (36,89%)
			De 211 a 360	oC3	1621 (20,94%)
5	Geomorfologia	2	Planícies de inundação, planícies aluviais; Planícies onduladas; Cume de Tajumulco, Montanhas vulcânicas e vulcões	gmC1	7642 (98,74%)
			Leques aluviais; Outros aluviões	gmC2	98 (1,26%)
6	Suscetibilidade de Movimentos na Geomorfologia	2	Ausência de movimentos	gmS1	98 (1,27%)
			Ocorrência de movimento	gmS2	7642 (98,73%)

TABELA 12 - SUBDIVISÃO DAS VARIÁVEIS NAS DIFERENTES MODALIDADES, CODIFICAÇÃO, FREQUÊNCIA ABSOLUTA E RELATIVA (CONTINUAÇÃO)

Variável n.º	Variável	N.º de Modalidades	Modalidades	Codificação	Frequência Relativa
7	Geologia	3	Rochas Ígneas e Metamórficas, terciário; Intrusivos graníticos; Rochas Ígneas e Metamórficas, Paleozóico	geC1	4274 (55,22%)
			Rochas Ígneas e Metamórficas, Quaternário; Pomes; Rochas Ígneas e Metamórficas do Terciário; Rochas Ígneas e Metamórficas, Quaternário; Vulcânicos (coladas, lahares, tobas)	geC2	3454 (44,62%)
			Aluviões Quaternários, Rochas Sedimentares	geC3	12 (0,15%)
8	Suscetibilidade de Movimentos na Geologia	2	Ausência de movimentos	geS1	3893 (50,3%)
			Ocorrência de movimento	geS2	3847 (49,7%)
9	Densidade de linhas de superfície	3	De 0 a 0,106	lsC1	3927 (50,7%)
			De 0,106 a 0,31	lsC2	2468 (31,9%)
			De 0,31 a 1,29	lsC3	1345 (17,4%)
10	Suscetibilidade de Movimentos na Densidade de linhas de Superfície	2	Ausência de movimentos	lsS1	6606 (85,35%)
			Ocorrência de movimento	lsS2	1134 (14,65%)
11	Densidade de linhas de água	3	De 0 a 1,06	wIC1	1139 (14,72%)
			De 1,06 a 2,11	wIC2	6280 (81,14%)
			De 2,10 a >4,14	wIC3	321 (4,14%)
12	Suscetibilidade de Movimentos na Densidade de Linhas de Água	2	Ausência de movimentos	wIS1	1460 (18,86%)
			Ocorrência de movimentos	wIS2	6280 (81,14%)

A passagem da variável Altitude de 5 a 3 modalidades (Tabela 11 e Tabela 12) faz parte da estratégia de recodificação dinâmica referida e no caso desta variável, ficou a dever-se ao comportamento anômalo evidenciado pelas mobilidades zC1 e zC2. Este comportamento anômalo (visualizado nos inúmeros outputs obtidos das inúmeras experiências efectuadas) resultada não de qualquer relação fenomenológica entre as baixas altitudes e os movimentos de massa, mas sim de poucas representatividades destas duas modalidades (37 e 193 registos) no conjunto de todas as observações.

Na recodificação das outras variáveis/modalidades os processos foram em tudo idênticas aos descritos para a variável altitude. Com efeito, a partir de uma matriz de input constituída por 0 e 1, indicada posteriormente na Tabela 13, é possível encontrar os “factores” (características estruturais básicas) que melhor explicam as relações de proximidade e oposição no interior do conjunto das Q variáveis (e p modalidades), no interior do conjunto das n amostras e nos dois conjuntos em simultâneo, conforme se mostra na Figura 22.

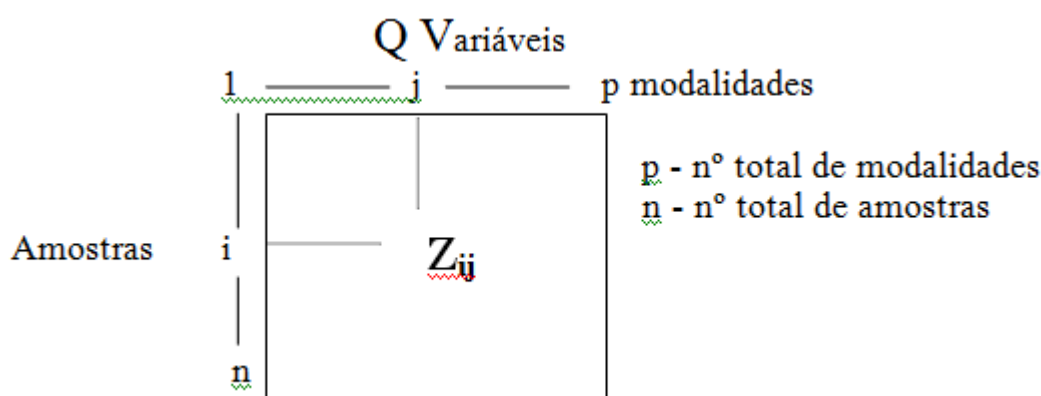


FIGURA 22 - MATRIZ DE PARTIDA PARA A ANÁLISE FACTORIAL DAS CORRESPONDÊNCIAS (AFC)

Como princípio prático da aplicação dos métodos factoriais, está a definição de uma estratégia recursiva, baseada na confrontação entre a codificação dos dados iniciais e a posterior interpretação dos resultados obtidos em função de uma dada codificação adoptada para o fim em estudo.

Assim sendo, neste trabalho, entende-se por codificação dos dados de partida, toda uma série de operações de transformação e rearranjo dos dados, até ser possível obter as matrizes de input que, submetidas à AFC, conduzem a resultados interpretáveis. Com efeito, as codificações utilizadas no presente trabalho foram do tipo: consideração de códigos identificadores para as amostras e modalidades; definição de limites de classes para as diferentes modalidades; agregação (na mesma variável) de diferentes modalidades;

desdobramento da matriz inicial dos dados de partida em sub-matrizes; projecção de modalidades e/ou variáveis em suplementar, etc.

Por sua vez, a justeza dos resultados obtidos apenas será avaliada, e validada caso a caso, face à clareza das interpretações sugeridas pela projecção da nuvem de pontos. Esta metodologia implica muitas vezes "voltar atrás" para que, numa perspectiva retroactiva (ver Figura 23) se possam ensaiar novas codificações, analisando-se em seguida as eventuais melhorias que essas modificações produziram no esclarecimento do fenómeno em estudo.

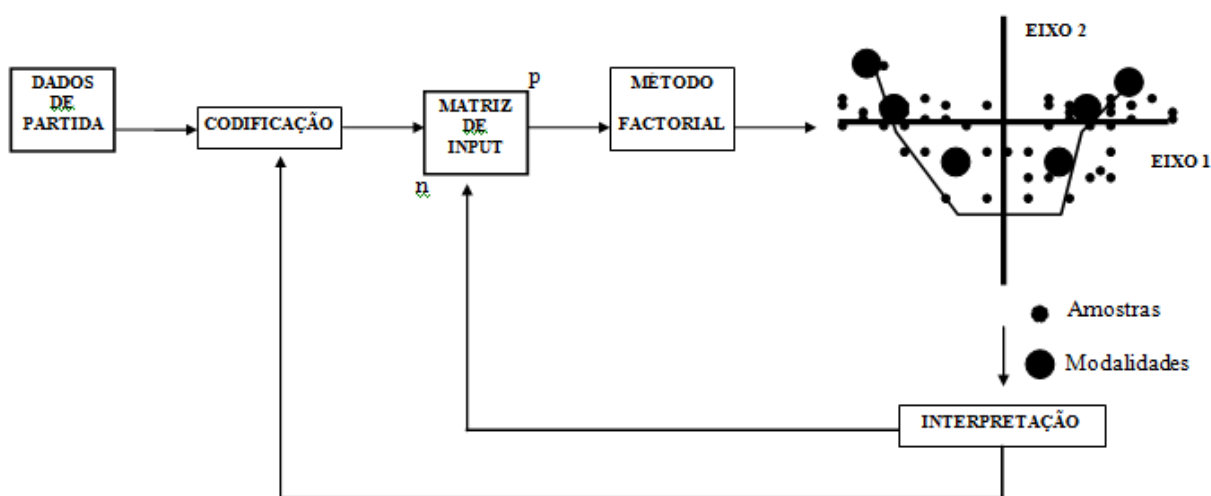


FIGURA 23 - RETROACÇÃO EM ANÁLISE FACTORIAL
FONTE: (GARCIA PEREIRA, 1990)

Em AFC, os factores, hierarquizados por ordem decrescente da sua importância para a explicação da tabela de partida, constituem um sistema de eixos ortonormais (espaço de dimensão compatível com a interpretação) onde é possível visualizar, sob a forma gráfica, as projecções da matriz de dados. A interpretação das projecções baseia-se assim num conjunto de regras que pretendem evidenciar as relações mais importantes existentes nos dados de partida “...a interpretação dos gráficos faz apelo a conceitos topo-morfológicos, ligados à posição relativa das projecções da nuvem inicial no espaço dos factores retidos e à própria forma sugerida pelo conjunto dessas projecções...”, (Pereira, H. G., 1990).

Seja Q o número total de variáveis e r_j o número de modalidades em que se subdivide a variável de ordem j , o número total de colunas da matriz de dados (leia-se o número total das modalidades das Q variáveis) é dado por:

$$p = \sum_{j=1}^Q r_j$$

Se designarmos agora por X a matriz de n linhas (n indivíduos ou amostras) por p colunas (p modalidades, preenchida em termos de presença - ausência através da seguinte codificação binária;

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 - \text{se o indivíduo } i \text{ ocorre na modalidade } j \\ 0 - \text{no caso contrário} \end{cases}, \quad \forall x_{ij} \in X$$

é possível construir o quadro de descrição lógica (matriz codificada em disjuntiva completa, ver Tabela 13) de tal forma que:

$$X = [X_1 | X_2 | \dots | X_Q]$$

onde o sub-quadro X_j com n' linhas e r_j colunas é tal, que a i -ésima linha contém $(r_j - 1)$ zeros e uma vez o valor 1 correspondente à modalidade da variável j onde ocorre o indivíduo i . Dando propriedade aos comentários anteriormente considerados, apresenta-se a seguir um pequeno exemplo, limitado no número de amostras e no número de variáveis/modalidades, da matriz de dados tratados (Tabela 13).

TABELA 13 - EXCERTO DA MATRIZ DE DADOS CODIFICADA EM DISJUNTIVA COMPLETA COM AS MODALIDADES UTILIZADAS NA AFCB

Variável	Altitude			Inclinação		Susc. Inclinação		...	Geologia			Susc. Geológica	
Modalidades → Amostras ↓	zc1	zc2	zc3	ic1	ic2	is1	is2	...	geC1	geC2	geC3	geS1	geS2
m1	0	1	0	0	1	1	0	...	0	0	1	1	0
m2	0	1	0	0	1	0	1		0	0	1	1	0
m3	0	1	0	1	0	1	0		0	0	1	1	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
m7738	0	0	1	0	1	0	1		0	0	1	1	0
m7739	0	0	1	0	1	1	0		0	0	1	1	0
m7740	0	0	1	1	0	1	0	...	0	0	1	1	0

m = movimentos ($m=7740$)

Q variáveis ($Q=12$) e p modalidades ($p=29$)

Como refere (Pereira, H. G.; Sousa, A. J., 1988), este sistema de codificação assegura que, seja qual for a natureza das variáveis, a soma em linha dos valores que surgem na tabela é constante e igual ao número de variáveis Q , o que se traduz numa homogeneidade estatística necessária para o processamento subsequente.

No caso dos dados em estudo, a tabela construída e codificada em disjuntiva completa para o primeiro ensaio apresenta-se como uma matriz de 29 colunas cuja soma em linha é sempre igual a 12 (número de variáveis) e cuja soma em coluna dá a frequência absoluta de cada modalidade das diferentes variáveis. Para cada variável, a soma das frequências absolutas das suas modalidades é sempre igual ao número de indivíduos amostrados n , e portanto o total em linha e em coluna reproduz nQ . Esta propriedade é importante, visto que, deste modo, a tabela de dados pode ser tomada como justaposição de tabelas de contingência.

As diferentes matrizes de informação utilizadas nos diferentes ensaios foram sujeitas a tratamento pelo *software* ANDAD (versão 7.10) (IST, 1998-2002).

Neste contexto, e para cada matriz pretende-se explicar a complexidade do sistema inicial com base num sistema de eixos ortogonais, no qual é possível visualizar graficamente as projecções das amostras e modalidades.

Ensaio 1 - Foi efectuado sobre o ficheiro de dados inicial, considerando-se todas as 12 variáveis, (as respectivas 29 colunas-modalidades) e a totalidade das 7.740 observações. Com este primeiro ensaio procura-se ter uma ideia geral das estruturas relacionais mais fortes que sobressaem da complexa profusão de projecções quer ao nível do gráfico da projecção das modalidades, quer ao nível do gráfico da projecção dos movimentos. Este facto, que torna ilegível e indiscernível a associação entre as diferentes variáveis (a menos das referidas estruturas relacionais fortes), obriga-nos a efectuar outros ensaios com o objectivo de conseguir planos fatoriais susceptíveis de poderem interpretar as associações entre as restantes variáveis. Estes novos ensaios são efectuados sobre sub-matrizes da matriz original de dados e face às suas menores dimensões (um menor número de modalidades envolvidas nos diferentes ensaios) tornam os resultados de mais fácil interpretação;

Ensaio 2 - Realizado sobre o ficheiro de dados inicial, considerando-se a totalidade dos 7.740 registos, as 12 variáveis originais e 26 modalidades. Projetam-se em suplementar as modalidades gmC2, (modalidade correspondente ao Leques aluviais; Outros aluviões, gmS1 (modalidade correspondente à ausência de movimento, da variável – Suscetibilidade

geomorfológica) e a modalidade geC3 indicadora da presença de aluviões quaternários e rochas sedimentares. Procura-se neste ensaio uma análise mais pormenorizada, tentando eliminar a distorção de escala induzida pelas elevadas coordenadas das modalidades referidas nos eixos factoriais. Estamos convictos que os elevados valores das modalidades nos eixos factoriais resultam mais do pequeno número de ocorrências em cada uma das modalidades referidas, do que o reflexo de qualquer eventual forte correlação entre as modalidades.

ENSAIO 1

Ficheiro inicial dos dados considerando-se a totalidade da informação disponível, matriz de 7740 registos (linhas) por 29 modalidades (colunas) em que subdividem as 12 variáveis.



ENSAIO 2

7.740 Amostras vs 12 variáveis (26 modalidades).
A partir da matriz inicial dos dados, projecção em suplementar das modalidades (gmC2, gmS1 e geC3).

FIGURA 24 - PLANO GERAL DOS ENSAIOS DESTINADOS A EXPLORAR OS DADOS INICIAIS EM TERMOS DE AFCB

Os 7.740 registos sujeitos a AFCB, conduziram às taxas de explicação da variabilidade total dos dados iniciais (%EXP) e respectiva percentagem acumulada (%ACU), que são representadas na Tabela 14.

TABELA 14 - TAXA DE EXPLICAÇÃO E SUA ACUMULADA – ENSAIO 2

EIXO DE INÉRCIA	% EXP	% ACU
1	19.46	19.46
2	15.51	34.98
3	14.30	49.27
4	11.73	61.01
5	8.00	69.01
6	7.39	76.39

8

RESULTADOS

Os resultados obtidos no primeiro ensaio encontram-se resumidamente sintetizados na Tabela 15 para o primeiro eixo obtido pela AFCB. A importância de cada um dos eixos é analisada pela coluna %EXP (taxa de inércia transportada). Assim sendo, verifica-se, por exemplo, que para o 1º Ensaio (ver tabela 15) o primeiro factor explica cerca de 25% da variabilidade contida na matriz inicial de dados.

TABELA 15 - RELAÇÕES DE PROXIMIDADE/AFASTAMENTO ENTRE AS MODALIDADES NOS EIXOS FACTORIAIS CONSIDERADOS (ENSAIO 1)

1º Ensaio			
Ensaio n.º 1	Número de Modalidades	Eixo 1	
		% EXP	Modalidades Relacionadas
Figura 25	29	25.4	gmC2, gmS1 e geC3

Para o Ensaio 1 - Plano factorial (1,2), é possível observar (projeção das modalidades – Figura 25) os comportamentos “anómalos” evidenciados pelas modalidades **gmC2**, **gmS1** e **geC3** que não susceptíveis de traduzirem qualquer tipo de estrutura relacional dos dados. Este comportamento é apenas consequência do reduzido número de ocorrências nestas modalidades.

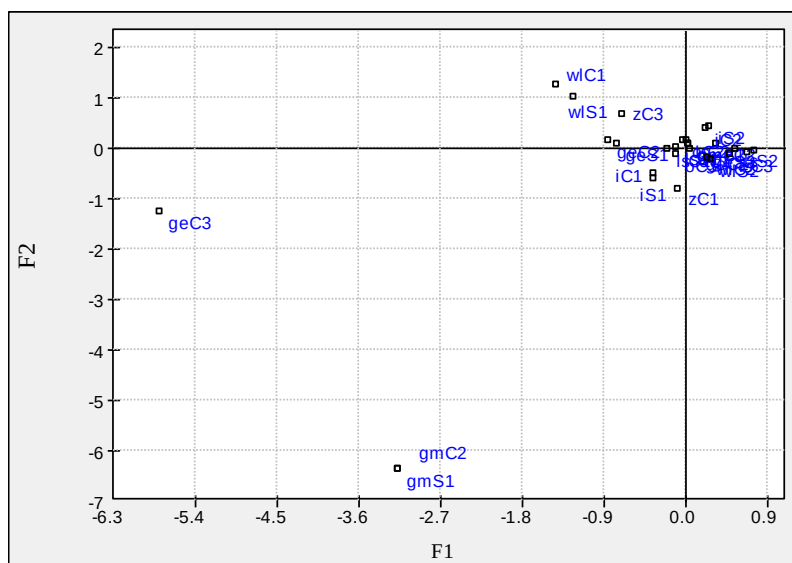


FIGURA 25 - AFCB - PROJEÇÕES DAS MODALIDADES NO PLANO FACTORIAL 1,2 – ENSAIO 1

Para considerar a representatividade de uma modalidade no eixo fatorial considerou-se que uma modalidade estaria relacionada com o eixo sempre que a sua contribuição absoluta for superior a $100/p$ modalidades. Este limite é dado na suposição de uma distribuição uniforme das contribuições pelas diferentes modalidades.

A título meramente explicativo poder-se-á referir que, relativamente no 2º ensaio, e para se identificar as variáveis mais significativas na construção de cada eixo, vamos considerar aquelas que possuem um valor de coordenada superior a $\pm 0,5$, ou cujas contribuições absolutas são superiores a 4 ($100/26 \cong 4$). Com esta metodologia conseguimos considerar os factores (eixos) a reter na análise, a qual leva em atenção o poder explicativo que determinado factor tem para uma dada modalidade, embora a variabilidade explicada por esse factor possa ser reduzida.

Dada a enorme profusão de *outputs* produzidos, optou-se pela reprodução, dos planos factoriais mais importantes (no seguimento da metodologia adoptada). Os ensaios referidos são aqueles que, de entre as várias centenas de ensaios efectuados, produziram resultados consentâneos com interpretações plausíveis.

A leitura e consequente interpretação dos planos factoriais tem que atender à relação dos eixos com as modalidades, à maneira como o eixo separa as modalidades (critérios geométricos de proximidade e afastamento) e, quando pertinente, aos aspectos morfológicos da nuvem das projeções das amostras nos planos factoriais. A análise dos planos factoriais, obtidos a partir da aplicação da AFCB, obedece ainda a algumas regras de

interpretação que passam pela escolha do número de eixos de inércia a reter (procuram-se taxas de inércia explicada com percentagens aceitáveis), pela simplicidade da interpretação, pela posição e contribuição absoluta das modalidades para a construção do eixo factorial, pela forma da nuvem de projecções cuja distribuição espacial pode dar indicações sobre a estrutura subjacente ao quadro de partida, etc.

«...A interpretação dos resultados de uma AFC consiste em atribuir um significado aos eixos de inércia em termos de propriedades – (ou indivíduos) que os explicam, num segundo passo, as proximidades e oposições entre indivíduos e propriedades são interpretadas com base no significado conferido aos eixos no primeiro passo...» (Pereira, H. G.; Sousa, A. J., 1988). É importante considerar o facto de que, a proximidade das projecções não é por si só critério suficiente para inferir da qualidade da representação, há ainda que garantir a representatividade dos pontos projectados no plano factorial.

TABELA 16 - RELAÇÕES DE PROXIMIDADE/OPOSIÇÃO ENTRE AS MODALIDADES NOS EIXOS FACTORIAIS CONSIDERADOS (ENSAIO 2)

2º Ensaio					
Ensaio n.º 2	Número de Modalidades	Eixo 1		Eixo 2	
		% EXP	Modalidades Relacionadas	% EXP	Modalidades Relacionadas
Figuras 25, 26, 27, 28 e 29	26	19.5	geS1, geC2, zC3, wS1 e wC1 ⇕ geC1 e geS2	15.5	zC1, iC1 e iS1 ⇕ IsC3, IsS2, iC2 e iS2
		Eixo 3		Eixo 4	
		% EXP	Modalidades Relacionadas	% EXP	Modalidades Relacionadas
		14.3	IsC2, IsS1 e IsC1 ⇕ IsC3, IsS2	11.7	zC1 ⇕ wS1, wC1
		Eixo 5		Eixo 6	
		% EXP	Modalidades Relacionadas	% EXP	Modalidades Relacionadas
		8.0	zC2, oC1, IsC2 ⇕ IsC1, oC2 e zC3	7.4	oC3 ⇕ oC2
Legenda					
- ⇕ - Representa a oposição das modalidades no eixo factorial					
- Os códigos assinalados a azul representam as modalidades correlacionadas com o semi-eixo factorial (positivo ou negativo) em análise.					

Em seguida passaremos a analisar os resultados finais da AFCB, considerando conjuntamente a informação veiculada pelas coordenadas e contribuições absolutas das modalidades nos eixos factoriais e contribuições absolutas superiores a 100/26 modalidades $\cong 4$ (2º ensaio), e pela visualização e interpretação das projecções nos planos factoriais. Para além das análises acima expostas, apresenta-se para o segundo ensaio (e também aqui somente a título de exemplo), a Tabela 1B em anexo, na qual se indicam as

coordenadas e contribuições absolutas das modalidades nalguns dos eixos factoriais. Em anexos reproduzem-se parte dos outputs obtidos.

A Tabela 2B em anexo auxilia-nos a interpretar a representatividade da variável no plano factorial, confirmando se a coordenada no eixo é a maior de todas. Isto é, estamos a ler a representatividade dos pontos. Ou seja, uma variável tem uma representação absoluta superiores a $100/26 \approx 4$ (representadas a negrito), a modalidade **zC1** apenas se encontra mais significativa no eixo 4, enquanto há outras modalidades que podem ser lidas em vários eixos. O de maior valor significativo é nitidamente lido no eixo correspondente. Outras modalidades como é o caso das modalidades acima supracitadas (**gmC1**, **gmS2** e **wlC2**) não são possíveis de leitura em nenhum eixo, isto é, numa primeira análise não são interpretáveis.

Em seguida passaremos a analisar os resultados finais da AFCB, considerando conjuntamente a informação veiculada pela Tabela 1B e 2B, e pela visualização e interpretação das projeções nos planos factoriais.

Na Figura 26, apresenta-se, para o 2º ensaio, as projeções das modalidades das variáveis que têm maior contribuição absoluta para a construção dos eixos fatoriais (F1/F2).

No semieixo negativo (F1), as modalidades correspondentes à geologia com rochas ígneas e metamórficas, de intrusivos graníticos (**geC1**) está fortemente correlacionado com a ocorrência de movimentos (**geS2**). Ainda no eixo 1 (semieixo positivo) a ausência de movimentos (**geS1**) e as rochas ígneas e metamórficas, de origem vulcânicas (**geC2**) estão correlacionadas positivamente entre si, e ainda correlacionadas com elevadas altitudes (**zC3**), a ausência de movimentos para a densidade de linhas de água (**wlS1**) e pouca densidade de linhas de água (**wlC1**). Este conjunto de variáveis está correlacionada negativamente com as variáveis que se projetam no semieixo negativo.

O 1º Eixo (eixo horizontal na figura 26), pode ser interpretado como sendo o factor que individualiza essencialmente as características geológicas com rochas ígneas e metamórficas, de intrusivos graníticos e ocorrência de movimentos das características geológicas e a não ocorrência de movimentos com as rochas ígneas e metamórficas, de origem vulcânicas.

No 2º Eixo (eixo vertical da figura 26), semieixo positivo, verifica-se uma correlação entre as baixas altitudes (**zC1**), a pouca inclinação (**iC1**) e a ausência de movimentos para a inclinação (**iS1**), este grupo de modalidades está correlacionado negativamente com o grupo de modalidades definido pelas elevadas altitudes e linhas de superfícies (**iC2** e **lsC3**) e a

presença de movimentos para a altitude e para as linhas de superfície (**is2** e **IsS2**) representadas no semieixo negativo.

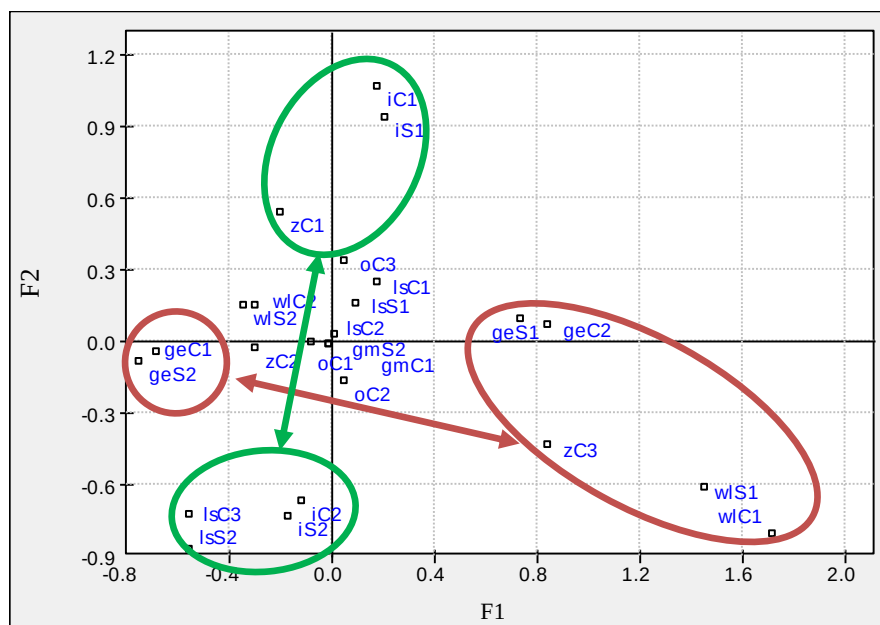


FIGURA 26 - AFCB - PROJEÇÕES DAS VARIÁVEIS NO PLANO FACTORIAL 1,2 – ENSAIO 2

Ainda para o Ensaio 2, a observação da Figura 27, considerando agora o plano factorial (F1 e F3), permite constatar (neste caso a análise incidirá nas projecções das modalidades consideradas significativas ao longo do 3º Eixo, a interpretação das modalidades projectadas ao longo do 1º Eixo já foi objecto de estudo anterior), uma associação positiva entre as modalidades correspondente à média densidade de linhas de superfície (**IsC2**), a ausência de movimentos na densidade de linhas de superfície (**IsS1**) e a baixas densidade de linhas de superfície (**IsC1**). Estas modalidades encontram-se em projecção muito próximas no semieixo positivo (F3) No semieixo negativo, verifica-se uma correlação elevada entre a densidade de linhas de superfície (**IsC3**) e a ocorrência de movimentos na densidade de linhas de superfície (**IsS2**).

Os dois grupos de modalidades identificados encontram-se em oposição, conforme se pode observar na Figura 26 representadas por círculos de cor verde, a leitura que podemos fazer é que este resultado traduz uma forte correlação negativa entre eles. Este eixo pode ser interpretado como sendo o factor que individualiza dois grupos caracterizados pelos códigos **IsC1, IsS1** e **IsC2** versus **IsC3** e **IsC2** e para os quais a justificação possível é que a densidade de linhas de água influencia a ocorrência de movimentos.

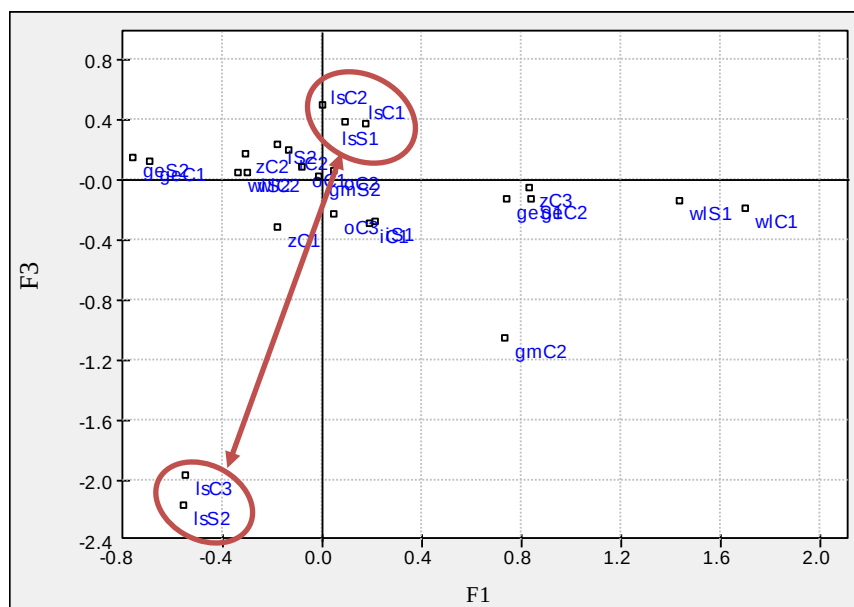


FIGURA 27 - AFCB - PROJEÇÕES DAS VARIÁVEIS NO PLANO FACTORIAL 1,3 – ENSAIO 2

No 4º Eixo (F4, Figura 27), semieixo negativo, é possível associar positivamente as modalidades correspondentes à ausência de movimentos da densidade de linhas de água (**wls1**) e a pouca densidade de linhas de água (**wlc1**) que estão negativamente correlacionadas com a baixa altitude (**zC1**). Uma possível interpretação para este eixo, é permitir-nos concluir que para uma baixa densidade de linhas de água se verifica a ausência de movimentos o que não ocorre em baixas altitudes. Os dois grupos de modalidades identificados encontram-se em oposição o que traduz uma forte correlação negativa entre eles.

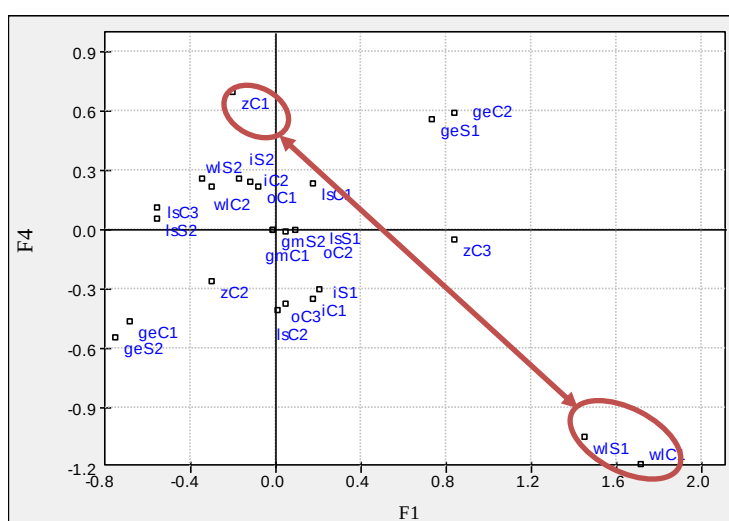


FIGURA 28 - AFCB - PROJECCÖES DAS MODALIDADES NO PLANO FACTORIAL 1,4 – ENSAIO 2

No 5º Eixo (F5, Figura 29), semieixo negativo, verifica-se que as orientações a Sul (**oC2**), a baixa densidade de linhas de água (**IsC1**) e a elevadas altitudes (**zC3**) estão relacionadas entre si e opõe-se ao grupo de modalidades correlacionadas entre si e constituído pelas altitudes intermédias (**zC2**), a média densidade de linhas de superfície (**IsC2**) e as orientações a Este (**oC1**).

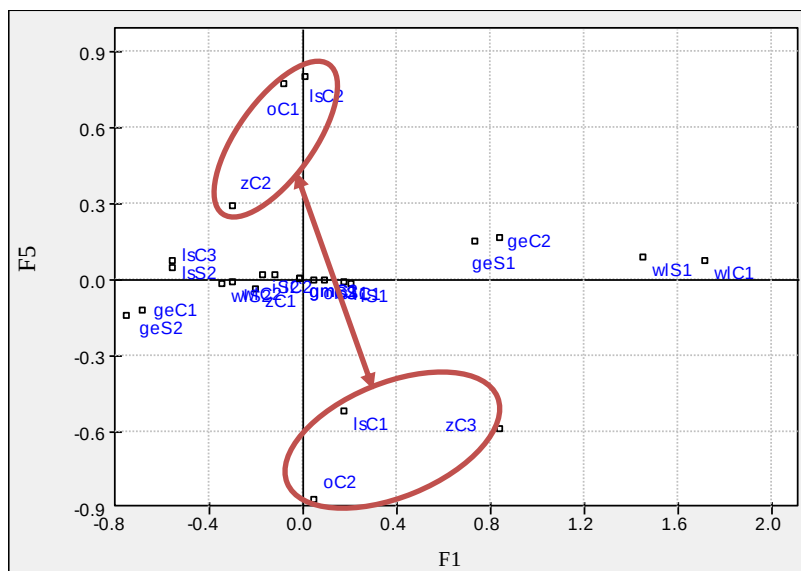


FIGURA 29 - AFCB - PROJEÇÕES DAS MODALIDADES NO PLANO FACTORIAL 1,5 – ENSAIO 2

Da Figura 30, 6º Eixo, conclui-se que as variáveis orientações a Sul (**oC2**) e orientações para Oeste (**oC3**), estão em oposição entre si, isto é, verifica-se uma correlação negativa entre as modalidades projetadas no semieixo negativo **oC2** e as modalidades projetam-se no semieixo positivo **oC3**.

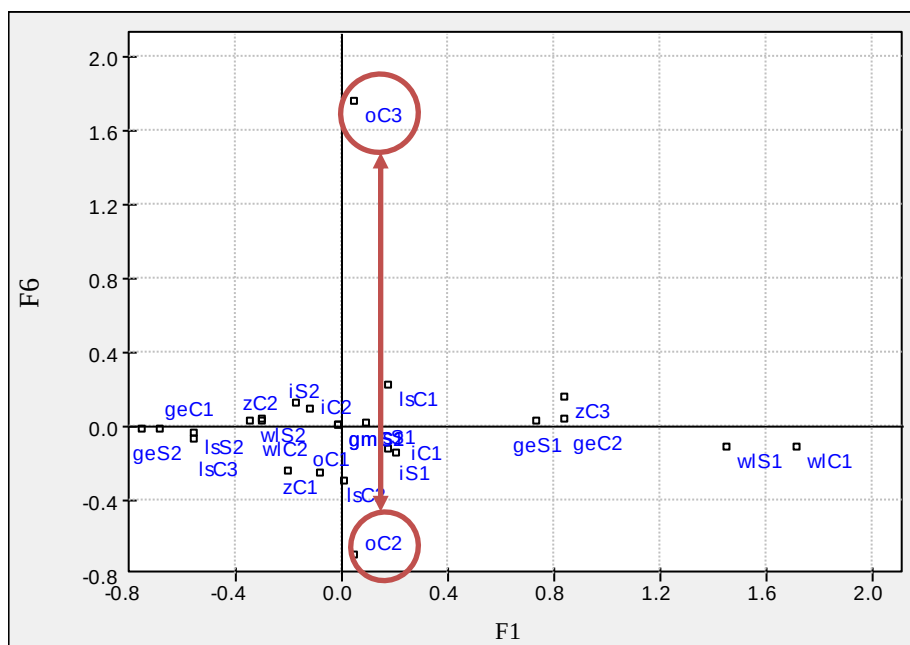


FIGURA 30 - AFCB - PROJEÇÕES DAS MODALIDADES NO PLANO FACTORIAL 1,6 – ENSAIO 2

O ensaio 2 é aquele cujo resultado é susceptível de interpretações válidas à luz da teoria da AFCB. Atenuadas as distorções provocadas pelos comportamentos anómalos de algumas das modalidades procurou-se, nestes dois ensaios, fazer emergir as múltiplas correlações entre as diferentes modalidades/movimentos e, desta forma, assinalar as fortes estruturas relacionais dos dados originais.

Dos resultados obtidos e que decorrem dos tratamentos estatísticos efectuados segundo a AFCB, é possível extrair as seguintes conclusões:

- Este método estatístico multivariado permite uma análise exploratória de acordo com características condicionantes dos movimentos de massa (altitude, inclinação, orientação, geologia, geomorfologia, densidade de alinhamentos estruturais e densidade de linhas de água);
- Através desta análise de dados, os resultados obtidos, consubstanciados nos gráficos bidimensional (planos factoriais das Figuras 26, 27, 28, 29 e 30) são possíveis de interpretação multivariável. Desta forma ultrapassa-se as limitações imposta pelas tradicionais análises de correlação (ex: coeficiente de correlação de Person, Spearman ou Kendall) que limitam o estudo de correlação as duas variáveis de cada vez;
- Existe uma relação entre a geologia com rochas ígneas e metamórficas, de intrusivos graníticos (**geC1**) e ocorrência de movimentos (**geS2**). Por sua vez, a

ausência de movimentos (**geS1**) e as rochas ígneas e metamórficas, de origem vulcânicas (**geC2**) estão não só correlacionadas positivamente entre si, e ainda correlacionadas com elevadas altitudes (**zC3**), a ausência de suscetibilidade para a densidade de linhas de água (**wIS1**) e a pouca densidade de linhas de água (**wIC1**) e, negativamente, quando comparadas com as primeiras;

- Verifica-se ainda uma relação entre as baixas altitudes (**zC1**), a pouca inclinação (**iC1**) e a ausência de movimentos para a inclinação (**iS1**), correlacionada negativamente com as elevadas altitudes e linhas de superfícies (**iC2** e **IsC3**) e a presença de movimentos para a altitude e para as linhas de superfície (**is2** e **IsS2**) representadas no semieixo negativo;
- Foi possível também verificar que para as médias e baixas densidade de linhas de superfície não susceptíveis à ocorrência de movimentos.

9

CONCLUSÕES

Para além das conclusões parcelares que ao longo deste trabalho foram sendo tiradas, tenta-se agora nesta fase, criar uma retrospectiva do estudo desenvolvido e, com base nos resultados obtidos, tecer algumas reflexões acerca dos mesmos.

Os modelos geomatemáticos aplicados aos 7.740 pontos da bacia hidrográfica de Suchiate, foram testados e demonstram resultados práticos, os quais confirmam que a associação das variáveis *inclinação, geologia e densidade de linhas de água*, são factores determinantes na análise dos movimentos de massa. Como seria expectável, verificou-se também que os resultados práticos obtidos demonstram a importância da acção da hidrodinâmica nos locais em questão e que são estes, juntamente com a inclinação e a geologia, os factores condicionantes mais importantes no desencadeando movimentos de massa.

Fica igualmente demonstrada as potencialidades da Análise Factorial das Correspondências no tratamento e interpretação da informação que foi objeto deste estudo. Face ao carácter genérico da metodologia adoptada a implementação destas análises a outras áreas geográficas (incorporando ou não outras variáveis) fica agora validada.

Por sua vez, a opção pela AFC, demonstrou também a grande flexibilidade que este método factorial apresenta no tratamento de matrizes de dados, cujas variáveis iniciais podem vir expressas em diferentes métricas.

A utilização destes modelos como ferramenta descritiva e explicativa de possíveis movimentos de massa, numa lógica operacional no âmbito de gestão urbana, permitirá uma gestão mais eficaz das opções técnicas e dos recursos, tendentes à minimização dos acidentes provocados pelos movimentos de massa.

Ultrapassa uma primeira fase em que a AFC identifica as variáveis (ou as suas modalidades) que, de forma mais intensa, contribuem para a ocorrência dos movimentos de massa, é possível passar para a fase seguinte que consiste na implementação de um

sistema de monitorização permanente que permita a construção de um modelo previsional dos acidentes.

É também na seleção das áreas/regiões de maior suscetibilidade que o trabalho estatístico da informação via AFC pode ser desempenhar um papel importante, nomeadamente, na identificação dessas mesmas regiões de risco.

Foi possível com a metodologia adoptada fugir à habitual apreciação qualitativa e apresentar, com base em informação contida em matrizes de 29 colunas por 7740 linhas, indicadores quantitativos de relações multivariáveis entre fatores condicionantes dos movimentos de massa.

POSFÁCIO

Aquando da chegada dos navios espanhóis no século XVI à Guatemala, os povos locais ofereceram resistência à colonização europeia, defendendo aquilo que era o seu território, a sua cultura e as suas tradições milenares.

Vários séculos depois, continuam a chegar ao continente latino-americano cidadãos europeus movidos por propósitos bastante diversos daqueles do passado: a partilha de conhecimento científico respeitando e valorizando a cultura local.

Os quatro meses em que tive oportunidade de contactar com diferentes costumes, adquirindo novas competências a nível cultural, linguístico e humano, consistiram, assim, numa experiência de vida com repercussões francamente positivas na minha visão do mundo como um todo.

Por outro lado, a possibilidade de desenvolver um estudo numa região em que os movimentos de massa representam um problema real e com impacto significativo na vida das populações já anterior à chegada de Pedro de Alvarado, constituiu uma motivação adicional para a realização do mesmo.

Assim, trata-se de um trabalho com uma importância que vai para além do seu valor para a minha formação académica, porquanto poderá contribuir para, futuramente, o desenvolvimento de um modelo matemático potencialmente aplicável, não só aquela região, mas também a tantos outros locais do mundo onde os movimentos de massa continuam a causar consequências devastadoras decorrentes da sua imprevisibilidade.

10

BIBLIOGRAFIA

- Alves, R., Góis, J., Requena, J., & Hernández, O. (2011). *Modelos Estadísticos Multivariados Aplicados no Estudo de Movimentos de Massa na Bacia Hidrográfica de Suchiate - Guatemala*.
- Barrier, E., Bourgois, J., & Michaud, F. (1990). *Le système de rift actifs du point triple de Jalisco*. Paris: Académie des Sciences.
- Bonachea, J. (2006). *Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a procesos geomorfológicos*. Santander: Departamento de ciencias de la tierra y física de la materia condensada.
- Carrara, A. M., & Cardinalli, M. (1991). *GIS techniques and statistical models in evaluation landslide hazard*. Earth Surface Processes and landforms.
- Cruden, D. M. (1991). *A Simple Definition of a Landslide*. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*.
- Cruden, D., & Varnes, D. (1996). Landslide types and processes. Washington D.C.: Transportation Research Board, National Research Council, No. 675.
- Cruden, D., & Varnes, D. (1996). *Slope movement. Types and processes*. En: *Landslides, Investigation and Mitigation* (Turner, A.K. y Schuster, R.L., Eds.). Washington D.C.: National Research Council.
- Eeckhaut, M. V., & et. al. (2009). *Combined landslide inventory and susceptibility assessment based on different mapping units: an example from the Flemish Ardennes*. Nat. Hazard Earth Syst. Sci.
- Galicia, G. O., & Requena, J. (2010). Determinación de la Amenaza por Deslizamientos en las Cuencas Hidrográficas Coyolate, Madre Vieja, Nahualate y Suchiate, Guatemala. *X Congreso Geológico de América Central*. Guatemala.
- Galicia, G. O., & Requena, J. (s.d.). Información Técnico-Científica para Reducir los Riesgos a Desastres.
- Galicia, G. O., & Requena, J. (s/ data). Información Técnico-Científica para Reducir los Riesgos a Desastres.
- Galicia, G.; Requena, J. (2010). Determinación de la Amenaza por Deslizamientos en las Cuencas Hidrográficas Coyolate, Madre Vieja, Nahualate y Suchiate, Guatemala. *X Congreso Geológico de América Central*. Guatemala.
- Góis, J. E. (1993). *Técnicas Geomatemáticas Aplicadas ao Tratamento de Dados da Prospecção Sísmica de Petróleos, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico*. Lisboa.

- Góis, J. E. (2003). Contribuição dos Modelos Estocásticos para o Estudo da Climatologia Urbana. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Góis, J. E. (2004). Contribuição dos Modelos Estocásticos para o Estudo da Climatologia Urbana. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Hauser, A. (1993). Remociones en massa en Chile. Santiago de Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería - Chile.
- Hauser, A. (1997). *Los aluviones del 18 de Junio en Antofagasta: un análisis crítico, a 5 años del desastre*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Horcajada, T., Simancas, M., & Dorta, P. (2000). *La constatación y validación de los mapas de riesgo de avenidas en pequeñas cuencas hidrograficas mediante sistemas de información geográfica. Propuesta metodológica y aplicación a la ordenación del territorio*. Boletín de la A.G.E. .
- Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. (s.d.). *Atlas Climatológico* . Departamento de Investigación y Servicios Meteorológicos.
- IST. (1998-2002). *Manual do utilizador - Programa ANDAD (Versão 7.10)*. Centro de Geosistemas do Instituto Superior Técnico .
- Jacoby, D. (2001). *Vulnerabilidad del sector urbano de La Reina frente a desbordes de la Quebrada de Ramón* . Santiago de Chile: Departamento de Ingeniería Civil .
- Keefer, D. (1984). *Landslides caused by earthquakes*. (G. S. America, Ed.)
- Laboratorio de Información Geográfica . (s.d.). Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA) Unidad de Planificación Geográfica y Gestión de Riesgo (UPGGR).
- Pereira, H. G. (1990). Análise de Dados Geológico-Mineiros. Aplicações e Estudo Metodológico, Tese de Agregação. Lisboa: Instituto Português Técnico.
- Pereira, H. G., & Sousa, A. J. (1988). Análise de Dados para Tratamento de Quadros Multidimensionais. Lisboa: Centro de Valorização de Recursos Minerais.
- Pereira, J. (2010). *Carta de Susceptibilidade e risco geológico do Sector sudoeste da Serra da Estrela*.
- Sánchez, E. H. (2010). *Monitoreo y Investigación de Riesgos en Guatemala*. Antigua, Guatemala: X Congreso Centro Americano de Geología.
- Scott, K. M., & et. al. (2001). *Catastrophic Debris Flows Transformed from Landslides in Volcanic Terrains: Mobility, Hazard Assessment and Mitigation Stratagies*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1630.
- Sepúlveda, S. A. (1998). *Metodologia para Evaluar el Peligro de Flujos de Detritos en Ambientes Montañosos: Aplicación en la Quebrada Lo Cañas, Región Metropolitana* . Santiago de Chile : Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Varnes, D. (1978). Slope movement types and processes in landslides, analysis and control. Washington D.C.: Transportation Research Board, Special Report No 176, pp. 11-33.
- Varnes, D.J. (1978). Slope movement types and processes in landslides, analysis and control. Washington D.C.: Transportation Research Board, Special Report No 176, pp. 11-33.
- Villamizar, N. (2006). *Los sistemas de información en la gestión de riesgos de origen antrópico*. La Rioja : Revista AHCIET.
- Zêzere, J. L. (2000). *A Classificação dos movimentos de vertente: Tipologia, actividade e morfologia*.

ANEXOS

ANEXO A

MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA - CLASSIFICAÇÃO DOS DESLIZAMENTOS

Introdução

As causas são múltiplas e variadas para a ocorrência de fenómenos de movimentos de massa. Com efeito, são mais ou menos complexas as situações que dão origem aos movimentos de massa, conforme já referido ao longo da presente dissertação. Assim sendo, embora não se enquadrando no âmbito deste trabalho, considerou-se útil abordar, muito sumariamente, esta problemática, pelo que passamos a classificar e a caracterizar as principais causas dos deslizamentos de massa.

- **Classificação:** São vários os critérios a classificar os movimentos gravitacionais de massa, sendo os mais recentes baseados nos estudos de “Augusto-Filho (1995)” e “Augusto-Filho e Virgili (1998)”, como a seguir se descreve:
- **Cinética do movimento:** É definida pela relação entre a massa em movimentação e o terreno estável (velocidade, direção e sequência dos deslocamentos).
- **Tipo de material:** Solo, rocha, detritos, depósitos, etc., sendo de destacar nestes as suas estruturas, textura e conteúdo de água.
- **Geometria:** Tamanho e forma das massas mobilizadas.
- **Modalidade de deformação do movimento:** Os deslizamentos também podem ser induzidos, muitas vezes, por escavamento natural da erosão marinha, ou de forma artificial quando se altera o ângulo da pendente devido a obras de escavações para infra-estruturas, estradas, túneis, caminhos-de-ferro, etc.

Também se verificam deslizamentos em regiões de climas com fortes amplitudes térmicas, a designada termoclastia, que provocam superfícies de ruptura, originando frequentes quedas de blocos. Ocorrem por sua vez alterações químicas da rocha devido à percolação da água através das fissuras, o que origina muitas quedas de blocos, principalmente em litologia carbonatadas. Muitas vezes se verifica que o mecanismo indutor direto para um forte deslizamento é a atividade sísmica.

Analisando de forma completa os trabalhos publicados neste domínio, bem como a sua evolução, os critérios, as restrições consideradas e outros aspectos relevantes das classificações, é de destacar os de Varnes (1958, 1978, Hutchinson (1968), Guidicini e Nieble (1974), Turner e Seuster (1996). Do conjunto destes trabalhos a classificação mais

utilizada internacionalmente é a do estudo de Varnes (1978), sendo a adoptada pela IAEG (Internacional Association for Engineering Geology and the Environment).

Neste contexto, cada um destes grandes grupos admite subdivisões, principalmente os deslizamentos e as corridas, perdurando várias classificações e terminologia específicas para cada um deste tipo de movimentos, conforme a seguir se descremina.

Desprendimentos

Constituem movimentações bruscas de material geológico (blocos de rochas, calhaus, areia, etc.), que decorrem da acção da gravidade, e frequentemente com velocidades elevadas (material solto devido à meteorização ou a outras causas).

Quedas de blocos e de detritos

Quanto às características deste tipo de movimento, o material e a geometria, podemos referir que se verificam sem planos de deslocamento, os movimentos podem dar-se em queda livre ou em plano inclinado, a velocidades muito altas (vários m/s), com material rochoso, pequenos e médios volumes, geometria variável (lascas, placas, blocos, etc.). Verificam-se geralmente em vertentes naturais muito inclinadas, como por exemplo o que se regista com as falésias.



FIGURA 1A - QUEDA DE BLOCOS
FONTE: (PEREIRA J. , 2010)

A separação do material susceptível de movimentação geralmente ocorre em superfície de ruptura, rasa ou profunda.

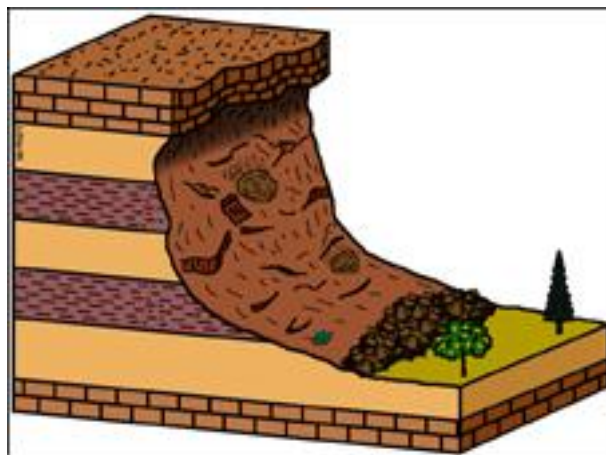


FIGURA 2A - QUEDAS DE DETRITOS
FONTE: (PEREIRA J. , 2010)

Rotacionais ou Slumps

São processos que ocorrem em geral com materiais homogêneos, sendo que a massa instável é considerada rígida. Podem ser simples ou sucessivos, sendo os simples quando se trata de uma superfície de ruptura rasa ou profunda, enquanto os sucessivos é quando se verificam em mais do que uma superfície de ruptura, estes podem ainda ser classificados em progressivos ou retrogressivos.

Normalmente, este tipo de movimentação afecta materiais não consolidados ou pouco consolidados, e deixam frequentemente cicatrizes arqueadas e/ou depressões na vertente.

Podem ser induzidos por mecanismos variados, sendo os mais comuns os devidos à pluviosidade intensa ou a atividade sísmica.

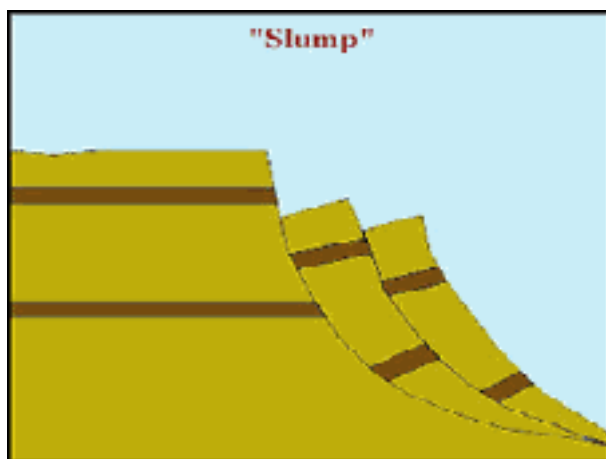


FIGURA 3A- DESLIZAMENTO ROTACIONAL
FONTE: (PEREIRA J. , 2010)

Quando este tipo de deslizamento se verifica em encostas fluviais e são de grande amplitude, sucede muitas vezes provocarem a deslocação do leito da linha de água, que devido aos materiais movimentados e impossibilitados de seguir o seu trajeto natural, a força da água rompe pelo caminho mais fácil que normalmente é a chamada “frente da movimentação”.

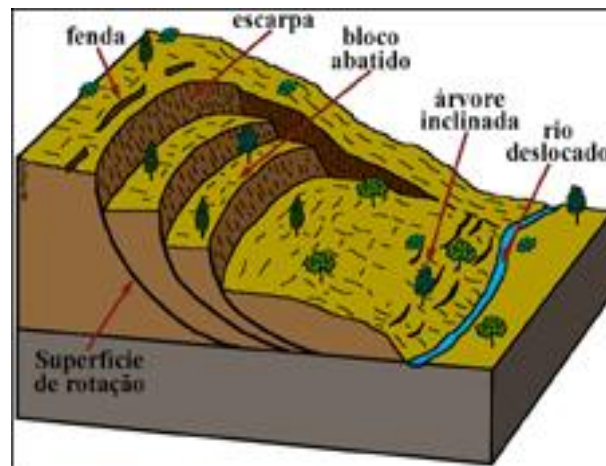


FIGURA 4A – EXEMPLO DE DESLIZAMENTO ROTACIONAL
FONTE: (PEREIRA J. , 2010)

Os deslizamentos rotacionais são frequentemente induzidos por atividade humana que aumenta o ângulo da vertente, por exemplo com a construção de uma nova estrada, originando a destabilização da encosta, que quando não acautelada a linha de água, e verificando-se forte pluviosidade acaba por provocar a cedência da vertente. Como resultado, este tipo de deslizamento são frequentes em estradas.

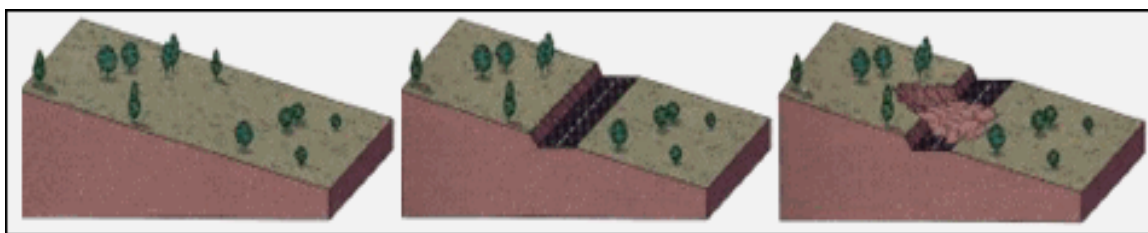


FIGURA 5A- INSTABILIDADE CAUSADA POR CONSTRUÇÃO DE VIA
FONTE: (PEREIRA J. , 2010)

Deslizamentos translacionais

Este tipo de acontecimento verifica-se muitas vezes em superfícies de ruptura plana, relacionadas com zonas que apresentam fraquezas estruturais (falhas, contacto solo/rocha, estratificação; movimento contínuo).

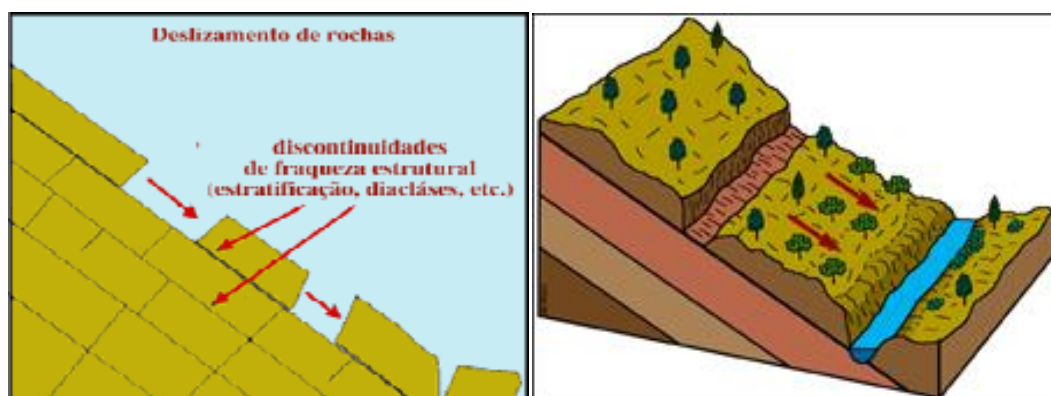


FIGURA 6A – EXEMPLOS DE DESLIZAMENTOS TRANSLACIONAIS
FONTE: (PEREIRA J. , 2010)

Fluxos sedimentares

Os fluxos podem ocorrer envolvendo muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação). Pode também ser um movimento semelhante ao de um líquido viscoso, ou desenvolvido ao longo das drenagens, com velocidades de médias a altas, com mobilização do solo, rocha e detritos e água, envolvendo grandes volumes de material e com raio de alcance extenso, mesmo em áreas planas.

Os vários tipos de fluxos sedimentares diferenciam-se entre si por fluxo granular, reptação, movimentos de terra, avalanches e fluxos aquosos.

Os fluxos granulares não são saturados com água. Podem ocorrer com pouca ou nenhuma água, visto que o comportamento fluido advém da mistura com o ar. Os movimentos de reptação são muito lentos, geralmente contínuos numa vertente, causado por tensões tangenciais suficientemente fortes e que acabam por produzir deformação permanente. Praticamente todas as vertentes (ou encostas) são afectadas por este tipo de movimentação, embora os ritmos a que se verificam sejam muito variados.

Nos fluxos de reptação podemos considerar há três tipos, a saber: **sazonal** - a movimentação é afectada por variações sazonais da humidade e da temperatura do solo; **contínua** - as forças tangenciais superam continuamente as de resistência do material; **progressivas** - as vertentes vão atingindo progressivamente o ponto de ruptura brusca.

Geralmente as evidências de fluxos de reptação são quando vimos árvores ou postes inclinados, fendas, descontinuidades no solo, e vedações distorcidas, etc.

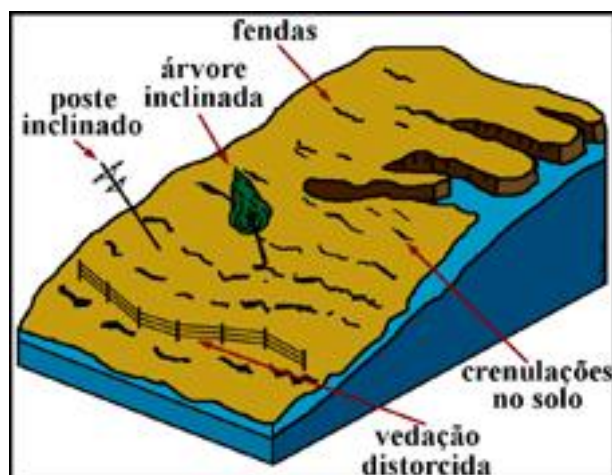


FIGURA 7A - FLUXOS DE REPTAÇÃO
FONTE: (PEREIRA J. , 2010)

Nos movimentos de terras o material, geralmente rególito, entra em liquefação e desloca-se para posições inferiores. A forma geral é alongada e apresenta forma lenticular característica, verificando-se na zona de cedência uma depressão e, normalmente, por um pequeno escarpado. A parte frontal corresponde a uma pequena elevação correspondente à principal área de deposição.

Estas movimentações tanto podem acontecer em condições em que não há envolvimento de grandes quantidades de água, como em situações em que o solo está saturado com água, desenvolvendo-se, então, movimentos do tipo fluxo detrítico).

Fluxos detríticos

Este tipo de movimento resulta do colapso completo de uma vertente íngreme, pelo que geralmente toma o nome de avalanche, verificando-se velocidades elevadas e grandes volumes de misturas de rocha e rególito. Este tipo de movimento de massa é complexo, isto é, resulta da combinação de vários tipos de movimentação (queda de rochas, deslizamento, fluxos vários).

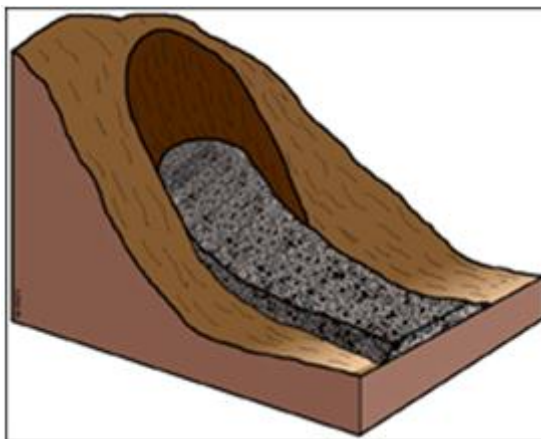


FIGURA 8A - FLUXOS DETRÍTICOS
FONTE: (PEREIRA J. , 2010)

De uma forma geral, quanto maior é a avalanche detritica maior é a velocidade a que ela se desloca, pois maior é a energia associada ao material em movimento.

Fluxos aquosos

São fluxos em que o solo e/ou sedimentos saturados de água se comportam como uma massa fluida e, como tal, têm comportamentos torrenciais e é do tipo turbulento.

Este tipo de fluxo contém geralmente entre 20% e 40% ou mais de água. Quando a quantidade de água corresponde a mais de 40% do fluxo, o deslizamento acaba por percorrer longas distâncias na rede fluvial, por vezes da ordem de dezenas de quilômetros. Em geral, devido à quantidade de sedimentos finos em suspensão, a mistura de água com sedimento comporta-se, na globalidade, como um fluido de densidade global elevada. Nestas condições podem transportar, eventualmente, elementos de massa de grandes dimensões. Em geral ocorrem na sequência de períodos de pluviosidade intensa ou moderada mas continuada por vários dias, e por isso, associados a cheias, sendo responsáveis por grandes catástrofes.

Por sua vez, quando um fluxo aquoso é designado por solifluxão, é quando se verifica que o deslizamento é da ordem das dezenas de cm/dia, e se verifica ao longo de uma vertente do rególito saturado com água.

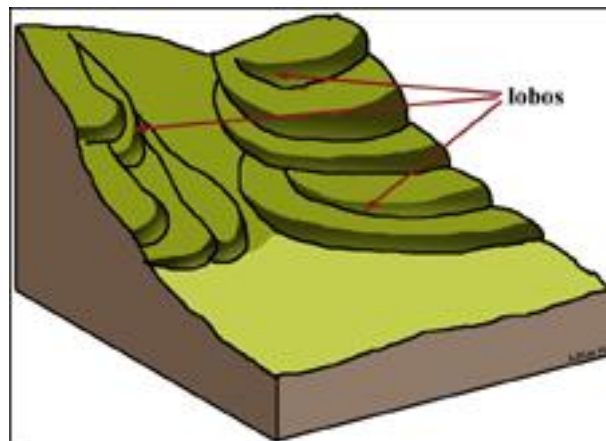


FIGURA 9A – SOLIFLUXÃO
FONTE: (PEREIRA J. , 2010)

São extremamente frequentes no permafrost (solos permanentemente gelados - constituem 20% da superfície dos continentes) e em que durante as estações quentes a parte superior do permafrost descongela, constituindo o degelo, e o sedimento, uma massa viscosa que flui por solifluxão sobre a camada gelada, constituindo uma topografia designada por lobada.

Fluxos de lama

Os fluxos de lama verificam-se em solos maioritariamente constituídos por argilas, e quando há períodos de pluviosidade muito elevada e em terrenos de forte ou média inclinação, esta associação dá origem a movimentos lentos de torrentes de lama. Movimentam-se usando a rede de drenagem, podendo por isso atingir grandes distâncias. Embora sejam normalmente lentos, no entanto, há registos de casos em que a velocidade chegou a atingir os 150 km/h.

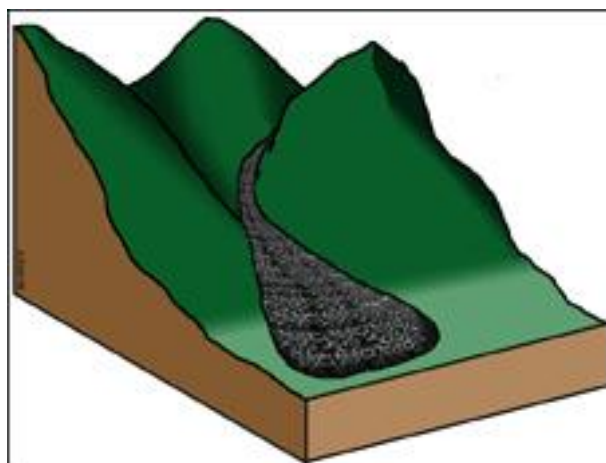


FIGURA 10A - FLUXO DE LAMA
FONTE: (PEREIRA J. , 2010)

Fluxos Lahars

È um tipo de fluxo que se verifica durante uma erupção vulcânica, mas também pode ocorrer em períodos em que o vulcão esteja inativo, e isto, como consequência da pluviosidade muito intensa. Os fluxos lahars deslocam material pela vertente do vulcão deixando os mais pesados para trás, transportando os mais finos para mais a jusante conforme o seu percurso prossegue encosta a baixo.

Fluxos rios de lama

Os fluxos rios de lama formam-se quando a quantidade de água é muito elevada e os solos têm grande percentagem de argilas, e são caracterizados por adquirirem velocidades bastante elevadas e por terem a capacidade de destruir tudo à sua passagem. Nestas situações, o solo passa a comportar-se como um fluído, daí a designação de rio de lama.

Em zonas áridas, os rios são normalmente muito encaixados nas montanhas, bastando verificar-se uma pluviosidade intensa, mesmo de curta duração, para que os rios adquiram grandes velocidades num espaço de tempo reduzido.

Nas zonas montanhosas aonde a pluviosidade é mais elevada, grandes quantidades de solo e rególito são arrastados encosta abaixo até ao rio. Nos pontos onde há confluência de um afluente com o rio, reúne-se uma maior quantidade de material arrastado, formando um grande rio de lama que, à medida que se aproxima do mar, vai aumentando de velocidade. Em outros casos, quando um rio de detritos encontra uma superfície plana, este expande-se perdendo velocidade, devido à proporção água/detritos, dado que se verifica que a água se vai infiltrando e a quantidade de detritos vai aumentando já que o leito e margens do rio vão sendo também arrastados.

As vertentes vulcânicas também são susceptíveis de provocar fluxos do tipo rios de lama, já que com chuvas torrenciais as cinzas recentemente caídas são facilmente arrastadas formando uma corrente de lama. É exemplo deste tipo de acontecimento o verificado com a cidade romana de Herculano, a qual foi atingida por uma corrente de lama vulcânica, acabando por ser totalmente destruída. Esta cidade localizava-se junto à base vulcão Vesúvio, no lado ocidental do mesmo, e não resistiu aos abanicos aluviais (outra designação dada a este tipo de movimento), gerados durante chuvas torrenciais que assolaram a montanha pouco tempo depois da erupção de 79 DC.

Por sua vez, nas zonas geladas e na época em que a neve começa a derreter devido ao calor da atmosfera, as argilas do alto das montanhas ficam saturadas podendo dar origem a

este tipo de movimentos. Uma vez que em determinado local se inicia um abanico aluvial, ele permanece durante semanas, continuamente.

Para terminar a descrição deste tipo de movimentos, falta apenas referir que eles podem também verificar-se em ambientes criados pelo homem, como por exemplo em escombreyras ou como consequência do rebentamento de barragens de contenção de resíduos. (Zêzere, 2000).

CRITÉRIOS PARA DESCRIÇÃO DOS MOVIMENTOS DE MASSA

Os critérios para se fazer uma descrição dos movimentos de massa, variam de acordo com a natureza do movimento. Com efeito, uma relação dos elementos considerados significativos para a descrição de um movimento de massa hipotético, já ocorrido ou em vias de ocorrer, de ser definida uma descrição e esta servir de base para uma sistemática caracterização do movimento.

Nesta conformidade, devem ser considerados os elementos significativos, os estilos do deslizamento, a velocidade, bem como o estado de atividade do deslizamento, conforme a seguir se esquematiza.

ELEMENTOS SIGNIFICATIVOS

Os elementos significativos a considerar são as características geométricas e morfológicas, isto é, a extensão do movimento, dimensões do deslizamento, inclinação da superfície externa, profundidade atingida pelo fenómeno, direção da movimentação, volume, forma, aspecto exterior, forma de manifestação (abatimento, deformação plástica, colapso, assentamento, abaixamento, desprendimento, conforme a Tabela 1A.

TABELA 1A - ELEMENTOS SIGNIFICATIVOS NA DESCRIÇÃO DE UM MOVIMENTO DE MASSA

Descrição	Extensão de movimentação, base ou zona de deposição
Natureza e estado do material envolvido	Material rochoso (maciço, estratificado, xistoso, gnaissificado, compacto, fracturado, desagregado), material incoerente (areias, lama, detritos, materiais aluviais), material coerente (argilas, não-saturadas, argilas endurecidas, argilas tixotrópicas..
Consequências na área	Influência na morfologia local ou regional, implicações económicas, mudanças no regime de escoamento superficial ou subterrâneo

ESTILO DO DESLIZAMENTO

TABELA 2A – ESTILO DO DESLIZAMENTO

Tipo	Descrição
Complexo	Apresenta pelo menos dois tipos de movimentos (queda, deslizamento de fluxo) em sequência
Composto	Apresenta pelo menos dois tipos de movimentos simultâneos em diferentes partes da massa deslocada.
Sucessivo	É do mesmo tipo de um deslizamento anterior vizinho, mas não compartilha com ele o material deslocado ou a superfície de ruptura.
Simple	É um simples movimento de material deslocado
Múltiplo	Apresenta repetidos desenvolvimentos no mesmo tipo de movimento

CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO A VELOCIDADE DO MOVIMENTO

Os movimentos de massa variam entre extremamente rápidos, com velocidades superiores a 5 m/s, a extremamente lentos, com velocidades inferiores a 16 mm/ano. Nesta

conformidade, quanto à velocidade, os movimentos gravitacionais de massa podem ser classificados em intervalos de categorias que vai de lentos a muito rápidos.

- **Deslizamento rápido** – É quando se verificam velocidades da ordem de alguns m/s, e verificam-se em zonas com elevada inclinação, onde domina a queda de rochas e detritos. Pode causar o deslizamento de uma enorme massa em segundos ou minutos. Entre este tipo temos, queda de blocos e o fluxo de lama ou detritos;
- **Deslizamento lento** - As velocidades são da ordem de algumas dezenas de centímetros ou de metros por ano. Caracterizam-se por transportar grande quantidade de material. As suas evidências são: a inclinação de árvores ou cercas a favor da vertente, a fractura da estrutura de casas, etc. (Figura 7A – movimento de reptação).

Numa forma mais resumida, na Tabela 3A é apresentada a classificação dos deslocamentos de acordo com a velocidade (Cruden & Varnes, 1996).

TABELA 3A – CLASSIFICAÇÃO DA VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO (CRUDEN & VARNES, SLOPE MOVEMENT. TYPES AND PROCESSES. EN: LANDSLIDES, INVESTIGATION AND MITIGATION (TURNER, A.K. Y SCHUSTER, R.L., EDS.), 1996)

Classe	Descrição	Velocidade		Poder destrutivo
7	Extremamente rápida	5×10^3 mm/s	5 m/s	Catástrofe de enorme violência, edifícios destruídos pelo impacto, matéria destruído, muitas mortes; evacuação improvável
6	Muito rápida	5×10^2 mm/s	3 m/min	Algumas perdas de vidas; velocidade demasiada alta para permitir a evacuação
5	Rápida	5×10^{-1} mm/s	1,8 m/h	Evacuação possível; estruturas, propriedades e equipamentos destruídos
4	Moderada	5×10^{-3} mm/s	13 m/mês	Algumas estruturas temporárias e pouco sensíveis podem manter-se temporariamente
3	Lenta	5×10^{-5} mm/s	1,6 m/ano	Construções fracas podem ser destruídas durante o movimento. Algumas construções razoáveis podem necessitar de manutenção frequente
2	Muito lenta	5×10^{-7} mm/s	16 mm/ano	Algumas estruturas permanentes não são danificadas pelo movimento
1	Extremamente lenta	$< 5 \times 10^{-7}$ mm/s	< 16 mm/ano	Imperceptível sem instrumentos; possível construção com devida precaução

TABELA 4A - ESTADO DE ACTIVIDADE DO ESCORREGAMENTO

Estado de atividade	Descrição
Ativo	Está atualmente em movimento
Paralisado	Moveu-se nos últimos 12 meses, mas no presente não está ativo
Reativado	É um deslizamento ativo que se encontrava inativo
Inativo	Não se moveu nos últimos 12 meses
Adormecido	Inativo que pode ser reativado por suas causas originais, ou por outras causas
Abandonado	Inativo que não está mais afetado pelas causas originais
Estabilizado	Inativo que está protegido de suas causas originais por medidas corretivas artificiais
Reliquiar	Um escorregamento inativo, que se desenvolveu sob condições climáticas e geomorfológicas consideravelmente diferentes das presentes. São também denominados movimentos de massas fósseis.

EFEITOS DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

Os principais efeitos que se podem verificar pelos movimentos gravitacionais de massa são os seguintes:

- Ruptura do solo;
- Erosão intensa;
- Destruição das infra-estruturas;
- Perda de vidas humanas;
- Derrocadas e grandes movimentos de terra;
- Destabilização de terrenos adjacentes;
- Interrupção de caudais fluviais e geração de albufeiras com desenvolvimento de eventuais avalanches de lama ou rochas.

De acordo com o trabalho de Keefer, na Tabela 5A apresenta-se uma síntese dos efeitos devido à atividade sísmica.

TABELA 5A - CLASSIFICAÇÃO DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA DE ORIGEM SÍSMICA
Fonte : (KEEFER, 1984)

Tipo de Movimento	Velocidade	Profundidade
Queda de Rocha	Extremamente rápido (> 3m/s)	Superficiais (< 3m)
Deslizamento de Rocha	Rápido e extremamente rápido (> 3m/s)	Superficiais (< 3m)
Avalanche de Rocha	Extremamente rápido (>3m/s)	Profundos (>3m)
Caída de Solo	Extremamente rápido (>3m/s)	Superficiais (< 3m)
Solo Perturbado	Moderado a rápido (1.5m/mês – 0.3m/min)	Superficiais (< 3m)
Avalanches de Solo	Muito rápido a extremadamente rápido (0.3 m/min - > 3m/s)	Superficiais (< 3m)
Subsidência de Rocha	Lento a rápido (1.5m/ano – 0.3 m/min)	Profundos (> 3m)
Deslizamento de Rocha em blocos	Lento a rápido (1.5m/ano – 0.3 m/min)	Profundos (> 3m)
Subsidência do solo em blocos	Lento a rápido (1.5m/ano – 0.3 m/min)	Profundos (> 3m)
Deslizamento de solo em blocos	Lento a rápido (1.5m/ano – 0.3 m/min)	Profundos (> 3m)
Fluxos lentos de Terra	Muito lento a moderado (0.6m/ano – 1.5m/dia)	Geralmente superficiais, ocasionalmente profundos
Extensões laterais de Solo	Muito rápido (0.3 m/min – 3 m/s)	Variável
Fluxos rápidos de solo	Muito rápido a extremamente rápido (0.3 m/min – 3m/s)	Superficiais (< 3m)
Deslizamentos subaquáticos	Geralmente rápidos a extremamente rápidos (~1.5 m/dia – > 3 m/s)	Variável

FACTORES DESENCADEANTES E CONDICIONANTES

Os factores desencadeantes podem ser considerados como factores externos que, ao atuar sobre as vertentes provocam instabilidade ao modificar as condições preexistentes. O factor desencadeante analisado foi a chuva. A sua influência na instabilidade é dupla, de um lado aumenta o peso específico unitário do terreno, com consequente aumento das forças desestabilizadoras. Por outro lado eleva o nível freático diminuindo desta forma a resistência do terreno por fricção devido a diminuição das superfícies potenciais de corte.

Existem certos factores que serão condicionantes da geração dos diferentes tipos de remoção de massa (Tabela 6A). Os factores condicionantes são os geradores de uma situação de potencial instabilidade. Estes correspondem principalmente à geomorfologia, geologia, geotecnia e vegetação, que atuam controlando a susceptibilidade de uma zona gerar fenómenos de remoção em massa, onde a susceptibilidade se define como a capacidade ou potencialidade de uma unidade geológica ser afectada por um determinado processo geológico (Sepúlveda, 1998).

Cada um dos diferentes processos de movimentação de vertentes tem génese e comportamento diferente. Este capítulo apresenta os diferentes factores a considerar para a determinação da susceptibilidade ou ameaça de cada evento de movimento de vertente em uma determinada zona. Os estudos apresentados permitiram confrontar metodologias específicas de forma a identificar as zonas críticas de possíveis eventos.

TABELA 6A - FACTORES CONDICIONANTES RELEVANTES PARA CADA TIPO DE MOVIMENTO DE MASSA (HAUSER, 1997)

Tipo de Movimento de MASSA Factores condicionantes	Quedas	Deslizamentos	Topping	Fluxos	Extensão de vertentes
Geologia e Geotecnia	X	X	X	X	X
Geomorfologia	X	X	X	X	X
Hidrologia e Hidrogeologia	X	X	X	X	X
Vegetação e Clima		X		X	X
Actividade Antrópica	X	X	X	X	

Os trabalhos realizados para avaliar e cartografar os riscos de deslizamentos de vertente mostram uma enorme variedade de métodos para atingir o mesmo objectivo. Atualmente existe uma postura quase unânime que é a de utilizar métodos indiretos que identifique os factores (condicionantes e desencadeantes) que controlam os movimentos de vertente. Da análise destes factores obteve-se um mapa de susceptibilidade, objectivo e com duração no tempo. É importante salientar que o numero de factores a analisar devem ser o menos possível e o máximo de representativos, já que ao incluir variáveis supérfluas não melhora os resultados, apenas complica, sobretudo o tempo dedicado a recolha de dados. Esta análise foi feita com poucos factores analisados devido a este projeto ter sido elaborado com mínimo de custo possível pois não possuiu qualquer ajuda de projeto e teve tempo de realização limitado

Como foi referido, é fundamental uma informação detalhada para uma ideal análise da ameaça por deslizamento, a qual no decorrer deste trabalho, ainda não foi documentada. É igualmente significativa a caracterização mecânica de solos superficiais e o seu potencial de deslizamento da área de estudo, assim como a localização dos níveis freáticos e a sua variação com o tempo. Mas como foi referido anteriormente, para este trabalho em particular, a informação detalhada ainda não se encontra disponível.

A informação disponibilizada até ao presente é considerada aceitável para uma análise indicativa de probabilidade à susceptibilidade a deslizamentos.

Os factores condicionantes estão unidos pela própria natureza, composição estrutura e forma de terreno, mas o número de variáveis com que definimos estes factores é elevado, por isso é necessário limitar. No entanto ainda não surgiu um consenso no tipo de variáveis a utilizar para este tipo de caso. Para este trabalho foram utilizados 6 factores condicionantes indicados na Tabela 7A e foi posteriormente determinado o mapa de susceptibilidade de deslizamentos.

TABELA 7A - FACTORES CONDICIONANTES E VARIÁVEIS DE ESTUDO

Factor	Variável
Geológico	Litologia, tipo de material
Topográfico	Inclinação das vertentes
Geomorfológico	Propriedades do terreno
Orientação das vertentes	Exposição N/S/E ou Oeste
Drenagem	Densidade da rede de drenagem
Alinhamentos estruturais	Densidade de alinhamentos

ANEXO B

RESULTADOS ANDAD

TABELA 1B - COORDENADAS DAS MODALIDADES NOS EIXOS FACTORIAIS – 2º ENSAIO

EIXOS FACTORIAIS → ↓ MODALIDADES	1	2	3	4	5	6
zC1	-0.195230	0.536500	-0.328970	0.691460	-0.041840	-0.249040
zC2	-0.298080	-0.028990	0.156730	-0.269500	0.287050	0.036600
zC3	0.847760	-0.434250	-0.038050	-0.054800	-0.590980	0.153140
iC1	0.181880	1.065110	-0.413120	-0.356050	-0.016440	-0.130990
iC2	-0.114050	-0.673700	0.260860	0.231100	0.011130	0.082080
iS1	0.208380	0.933230	-0.390190	-0.310130	-0.020870	-0.146510
iS2	-0.163410	-0.735420	0.307170	0.250830	0.017290	0.114800
oC1	-0.071780	-0.011310	0.083420	0.210960	0.768720	-0.259500
oC2	0.055780	-0.166270	0.066300	-0.017040	-0.874120	-0.702050
oC3	0.051800	0.330870	-0.291970	-0.382740	-0.006440	1.754930
gmC1	-0.005500	-0.015140	0.007590	-0.012150	-0.002240	0.003810
gmS2	-0.005500	-0.015140	0.007590	-0.012150	-0.002240	0.003810
geC1	-0.680530	-0.049430	0.103020	-0.470550	-0.127550	-0.026090
geC2	0.843270	0.063780	-0.130600	0.585050	0.159810	0.032800
geS1	0.740420	0.092990	-0.136970	0.553840	0.144730	0.016290
geS2	-0.746940	-0.087670	0.135550	-0.555400	-0.145660	-0.018250
lsC1	0.180010	0.241740	0.347850	0.229370	-0.521510	0.212180

IsC2	0.015920	0.022500	0.485470	-0.416130	0.792480	-0.298760
IsC3	-0.548150	-0.728700	-1.915160	0.108400	0.070740	-0.076270
IsS1	0.095780	0.154150	0.359700	-0.005140	-0.007040	0.006890
IsS2	-0.550140	-0.876220	-2.105670	0.047260	0.043640	-0.045960
wIC1	1.722480	-0.814080	-0.167620	-1.190460	0.073110	-0.123230
wIC2	-0.295880	0.144210	0.027160	0.208380	-0.012160	0.020260
wIS1	1.454690	-0.618000	-0.130690	-1.051920	0.081880	-0.113540
wIS2	-0.336790	0.147610	0.028530	0.247670	-0.018550	0.025340

TABELA 2B - CONTRIBUIÇÕES ABSOLUTAS SUPERIORES A 4 (100/26 MODALIDADES) - 2º ENSAIO

EIXOS FACTORIAIS → ↓ MODALIDADES	1	2	3	4	5	6
zC1	0.344457	3.263277	1.331685	7.168265	0.038482	1.476991
zC2	1.856302	0.022027	0.698769	2.517319	4.187208	0.073747
zC3	6.813953	2.242876	0.018690	0.047234	8.054256	0.585906
iC1	0.507528	21.834918	3.565246	3.226637	0.010086	0.693688
iC2	0.313126	13.706738	2.230439	2.132880	0.007253	0.427367
iS1	0.757591	19.062178	3.616778	2.783865	0.018484	0.986858
iS2	0.586611	14.905146	2.822262	2.292925	0.015974	0.762912
oC1	0.085639	0.002667	0.157489	1.227159	23.890523	2.949408
oC2	0.045240	0.504272	0.087024	0.007004	27.023012	18.884196
oC3	0.022147	1.133575	0.958046	2.005897	0.000833	66.985396
gmC1	0.001177	0.011190	0.003052	0.009530	0.000475	0.001489
gmS2	0.001177	0.011190	0.003052	0.009530	0.000475	0.001489
geC1	10.079923	0.066714	0.314523	7.994881	0.861292	0.039040
geC2	12.507372	0.089758	0.408475	9.987494	1.092615	0.049863
geS1	10.868818	0.215066	0.506435	10.088636	1.010113	0.013863
geS2	10.929430	0.188886	0.490086	10.024798	1.010958	0.017193
lsC1	0.648078	1.466235	3.295073	1.745602	13.230802	2.372688
lsC2	0.003185	0.007981	4.032887	3.610276	19.197635	2.955880
lsC3	2.057499	4.561531	34.197758	0.133486	0.083348	0.104965
lsS1	0.308596	1.002768	5.926096	0.001474	0.004055	0.004208
lsS2	1.748241	5.563568	34.872424	0.021403	0.026758	0.032152
wlC1	17.208128	4.822050	0.221883	13.636178	0.075406	0.232090

wIC2	2.942846	0.877000	0.033763	2.421509	0.012090	0.036359
wIS1	15.728772	3.561256	0.172856	13.644485	0.121209	0.252493
wIS2	3.627682	0.874208	0.035446	3.254584	0.026769	0.054115

Assinalam-se a negrito as modalidades que estão correlacionadas com o eixo factorial. O critério consistiu na consideração dos valores da contribuição absoluta da modalidade no eixo factorial. Consideram-se as contribuições absolutas superiores a 4 (100/26 modalidades).

ANEXO C

ANÁLISE ESTATÍSTICA

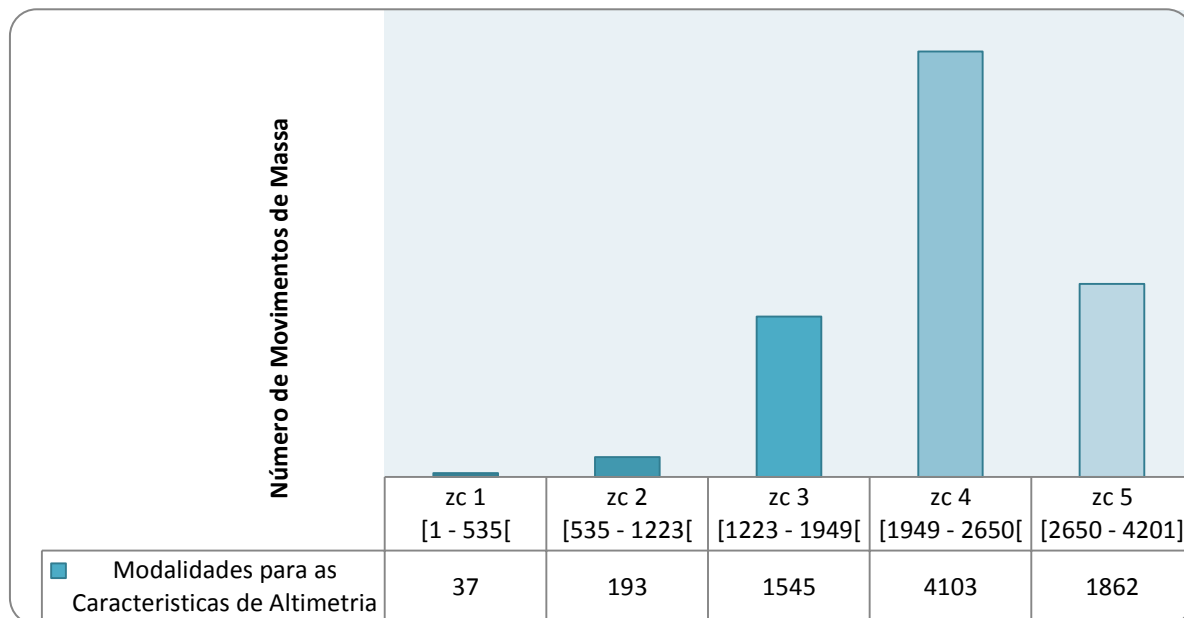


FIGURA 1C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – MODALIDADES PARA AS CARACTERÍSTICAS DE ALTIMETRIA

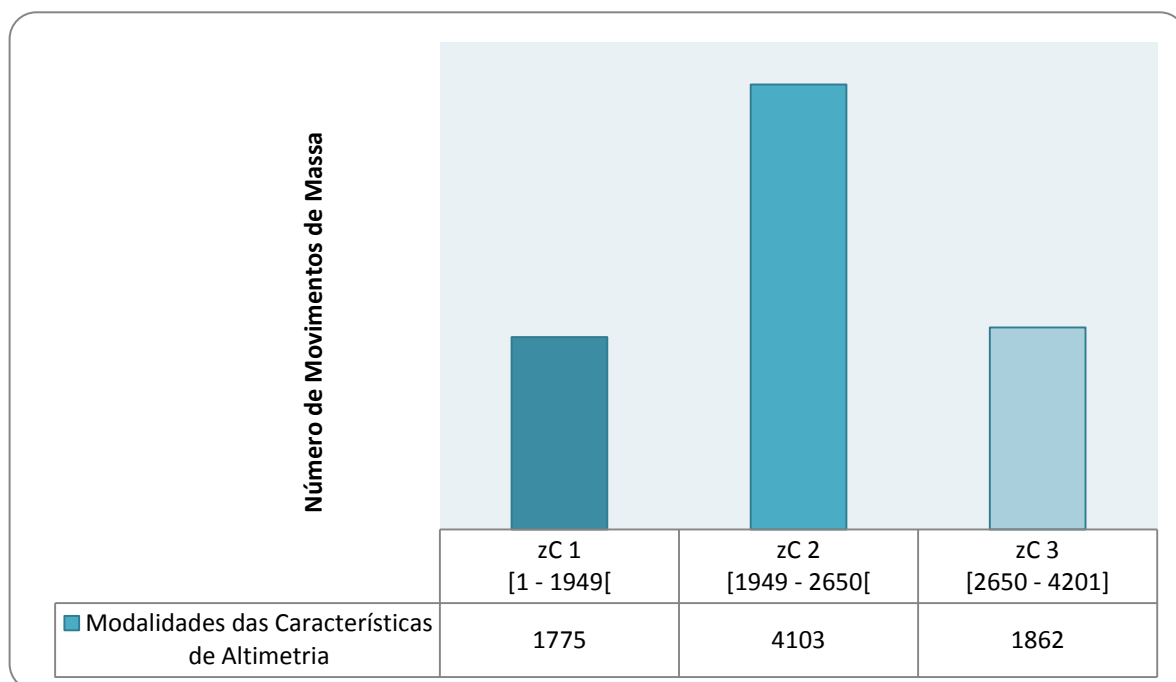


FIGURA 2C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – MODALIDADES PARA AS CARACTERÍSTICAS DE ALTIMETRIA - DISJUNTIVA

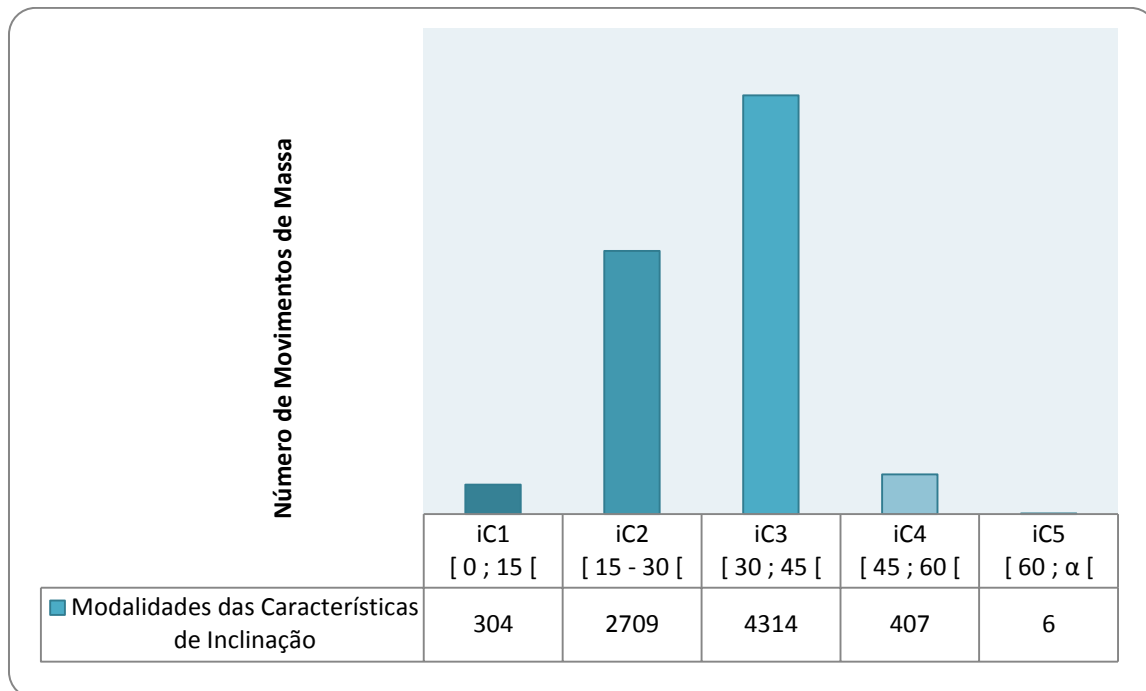


FIGURA 3C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – MODALIDADES PARA AS CARACTERÍSTICAS DE INCLINAÇÃO

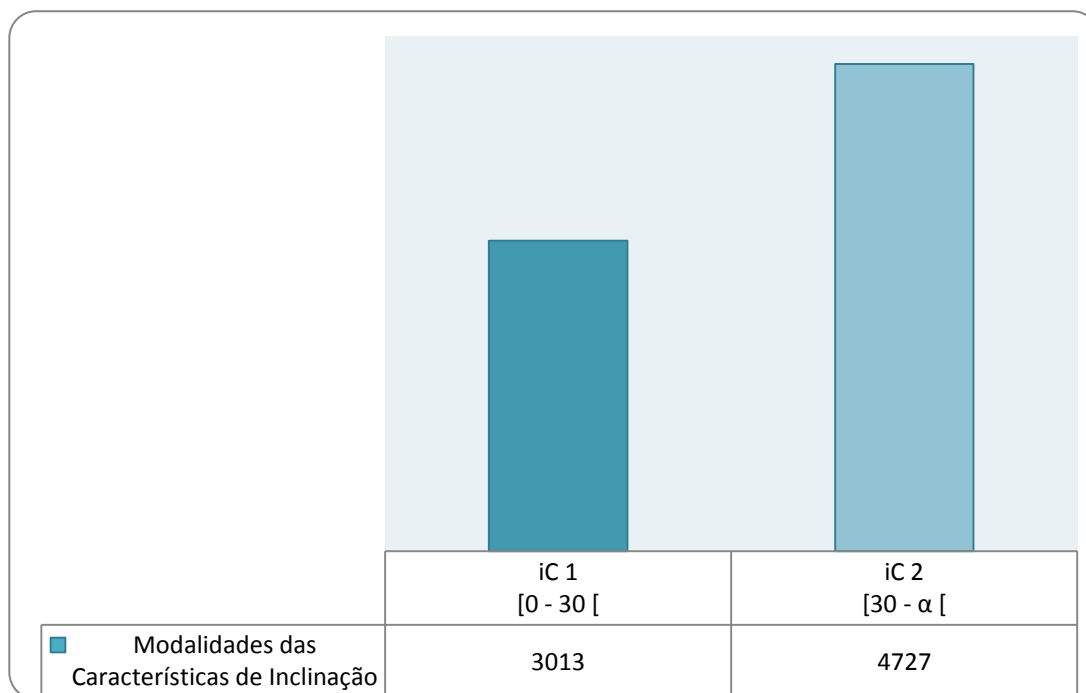


FIGURA 4C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – MODALIDADES PARA AS CARACTERÍSTICAS DE INCLINAÇÃO - DISJUNTIVA

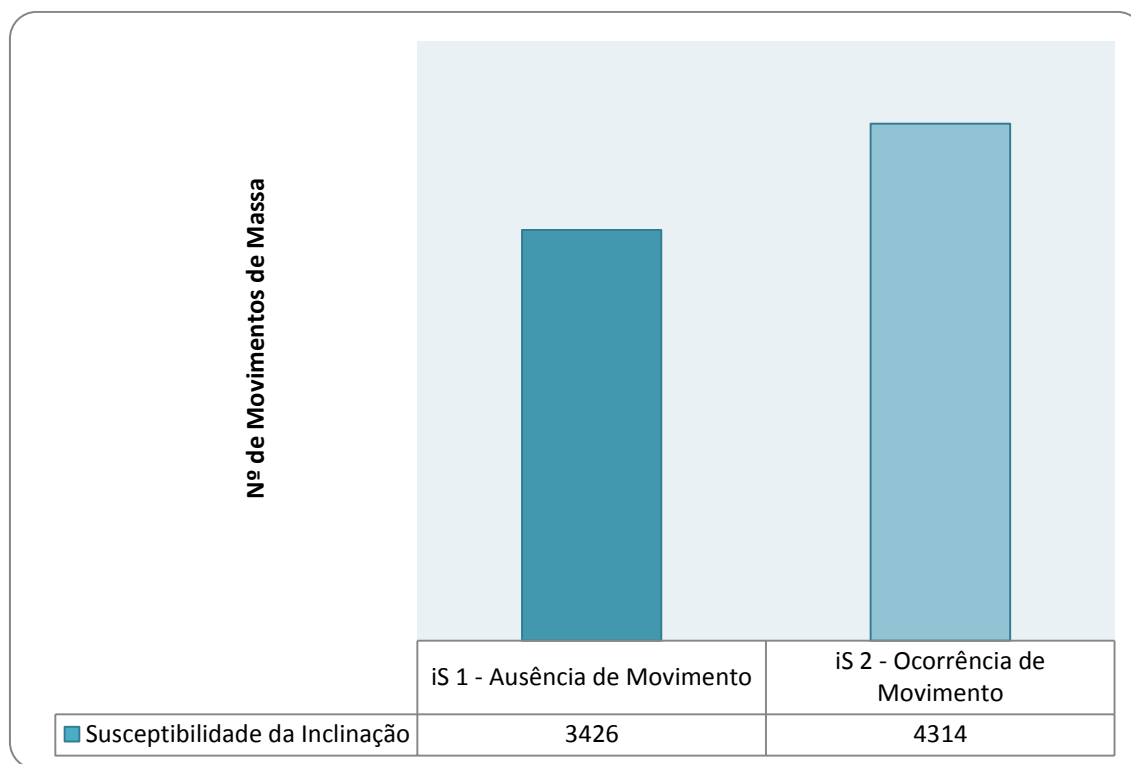


FIGURA 5C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – SUSCEPTIBILIDADE DE INCLINAÇÃO

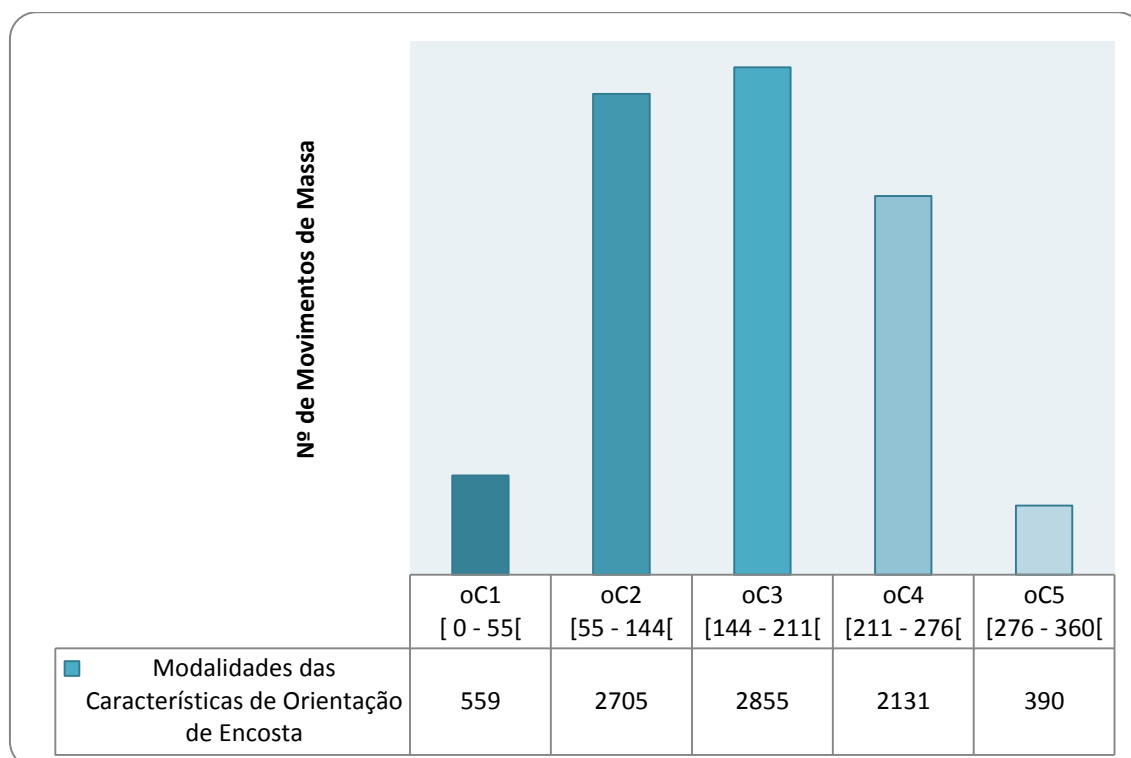


FIGURA 6C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – MODALIDADES PARA AS CARACTERÍSTICAS DE ORIENTAÇÃO DE ENCOSTA

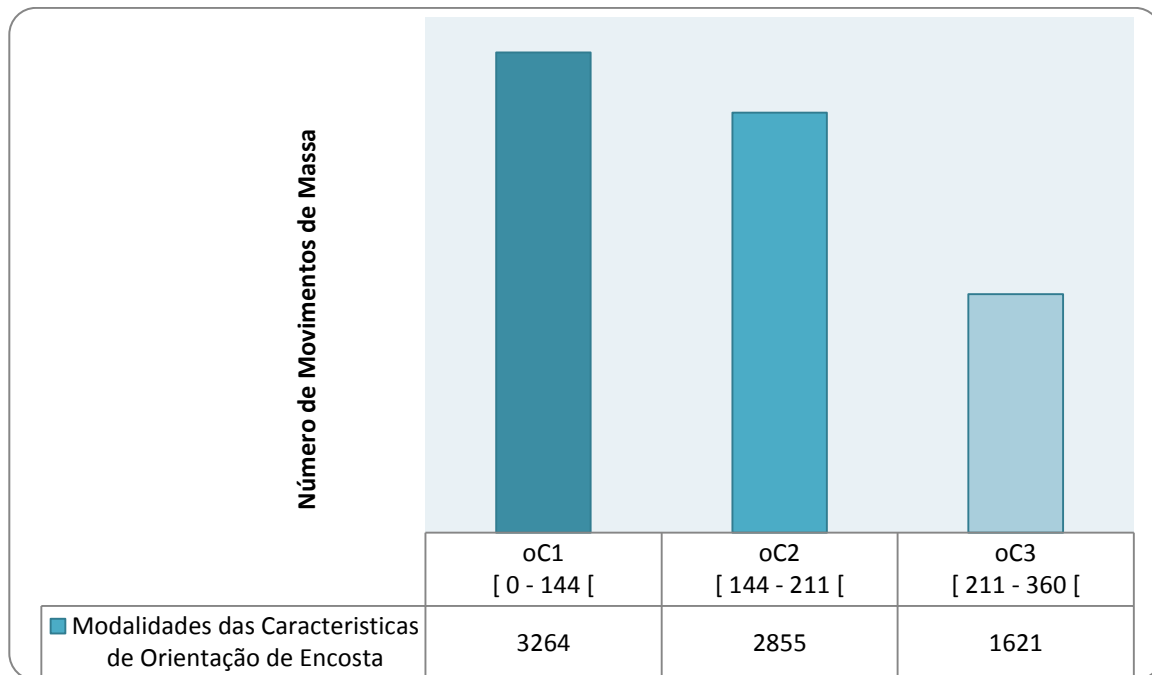


FIGURA 7C– NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – MODALIDADES PARA AS CARACTERÍSTICAS DE ORIENTAÇÃO DE ENCOSTA – DISJUNTIVA

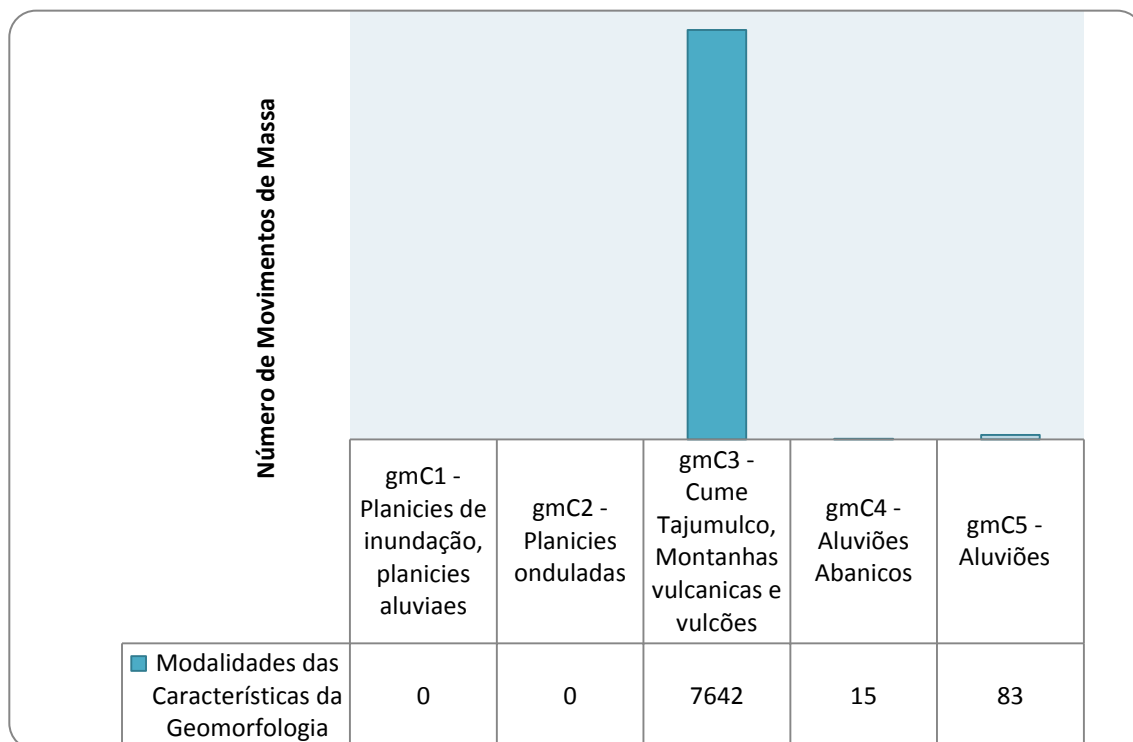


FIGURA 8C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – MODALIDADES PARA AS CARACTERÍSTICAS DA GEOMORFOLOGIA

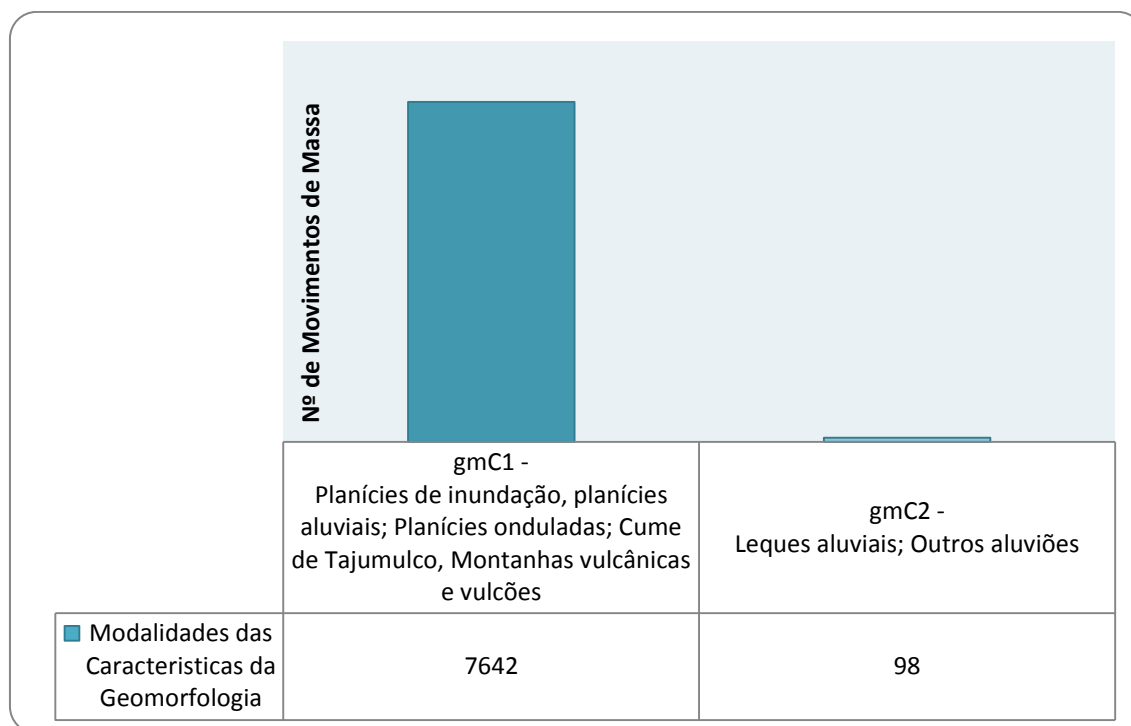


FIGURA 9C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – MODALIDADES PARA AS CARACTERÍSTICAS DA GEOMORFOLOGIA – DISJUNTIVA

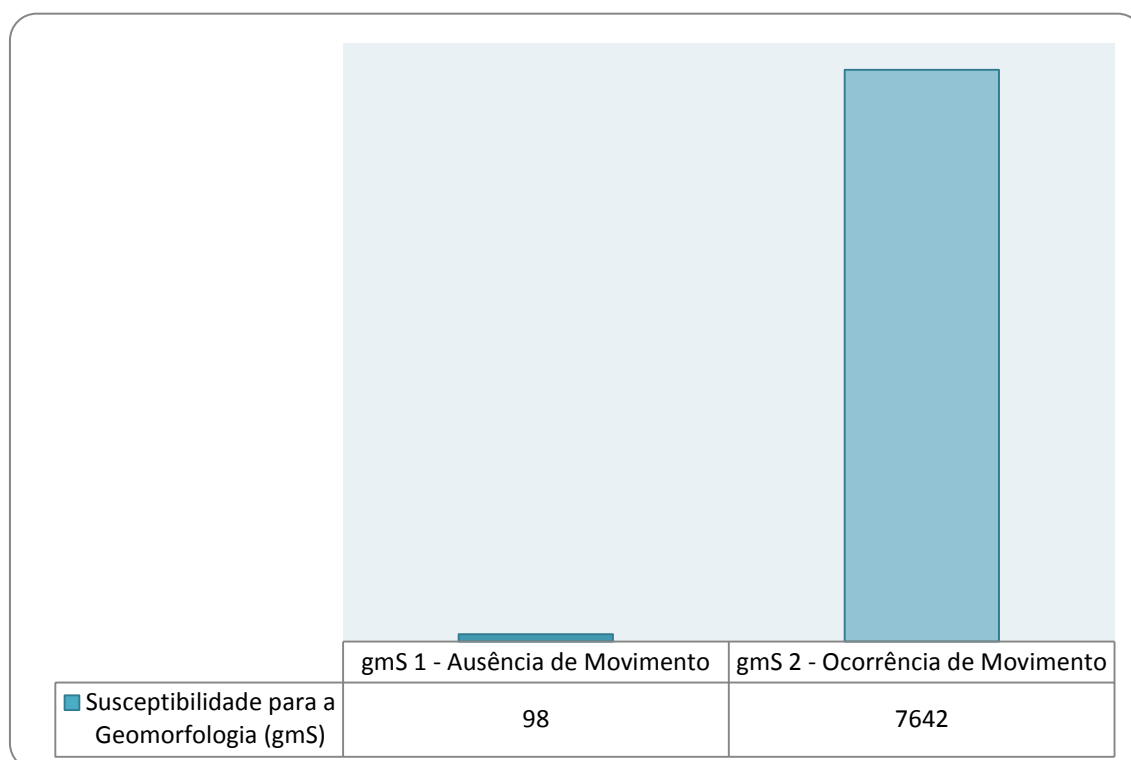


FIGURA 10C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – SUSCEPTIBILIDADE PARA A GEOMORFOLOGIA

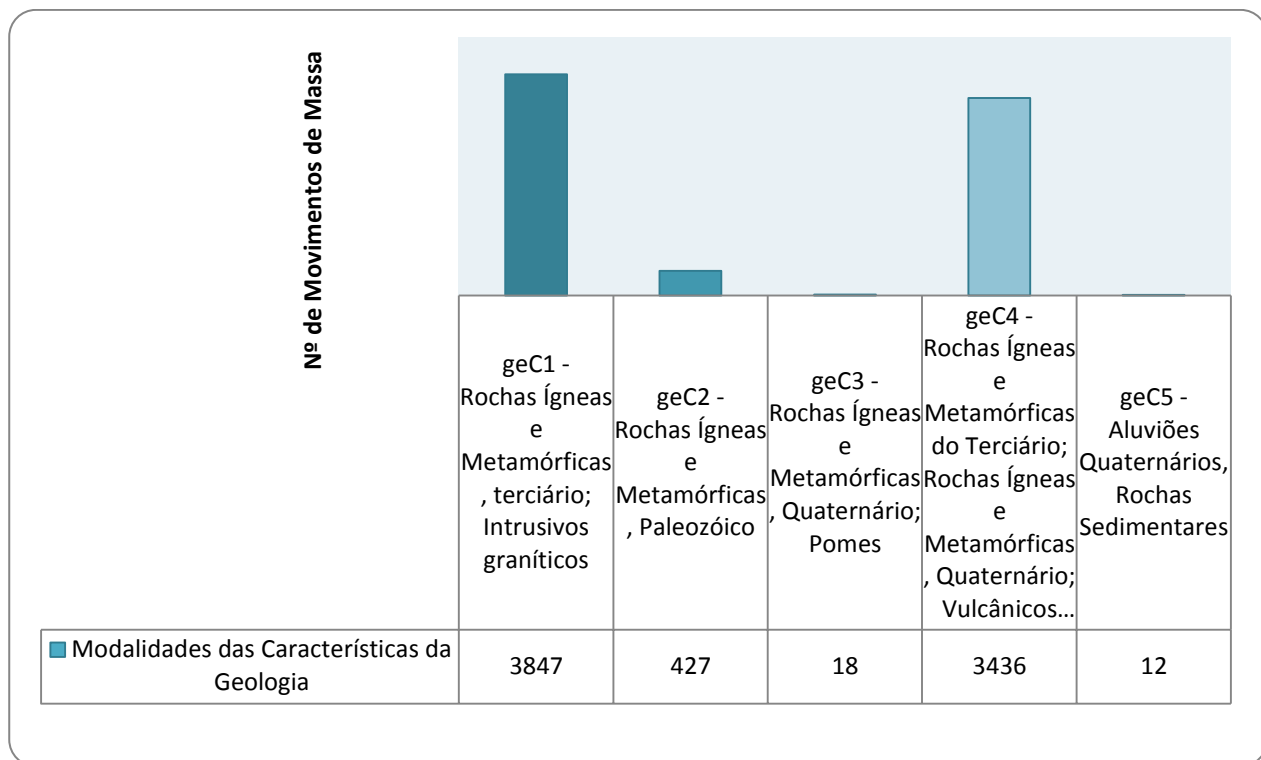


FIGURA 11C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – MODALIDADES DAS CARACTERÍSTICAS DA GEOLOGIA

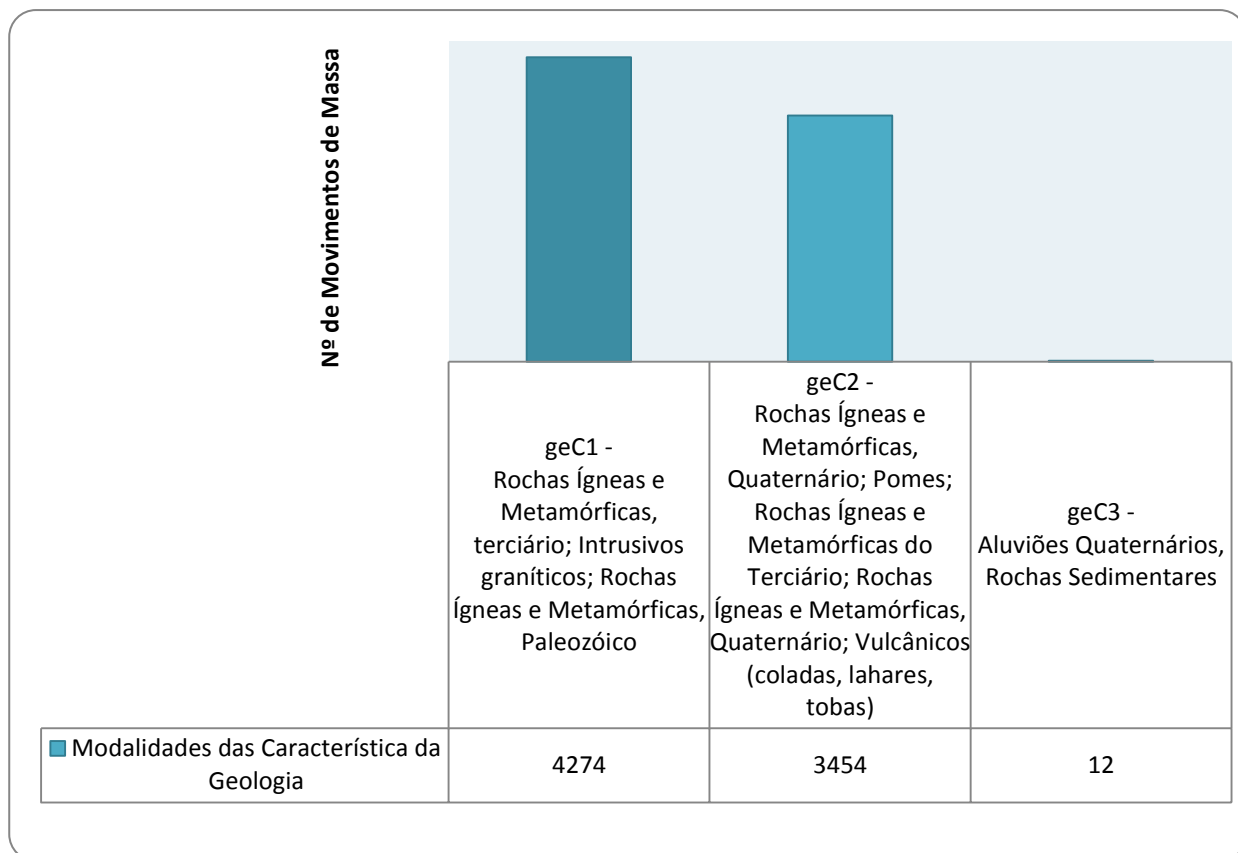


FIGURA 12C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – MODALIDADES DAS CARACTERÍSTICAS DA GEOLOGIA - DISJUNTIVA

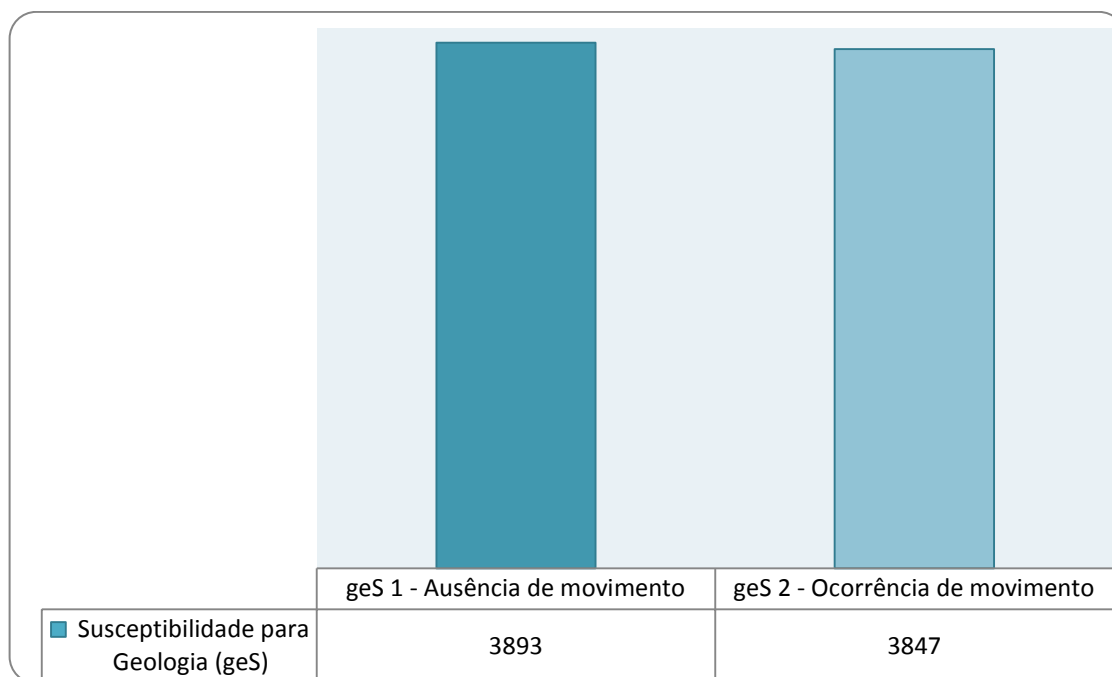


FIGURA 13C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – SUSCEPTIBILIDADE PARA A GEOLOGIA

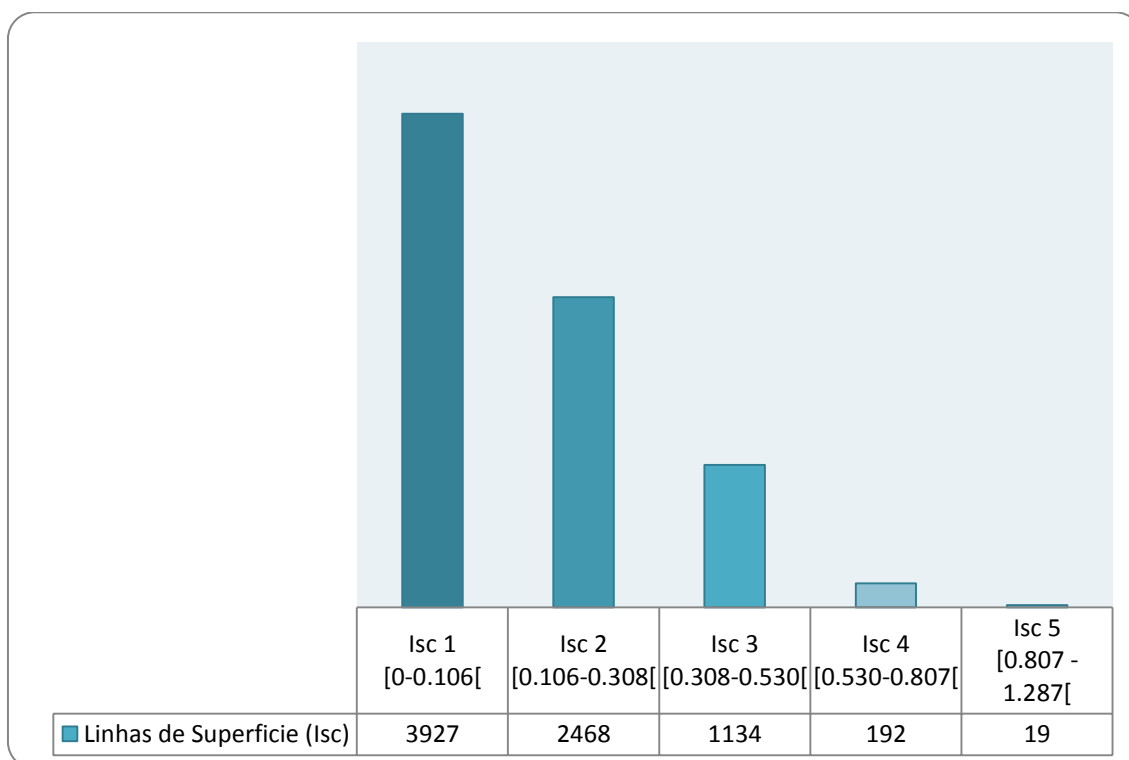


FIGURA 14C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – DENSIDADE DE LINHAS DE SUPERFÍCIE

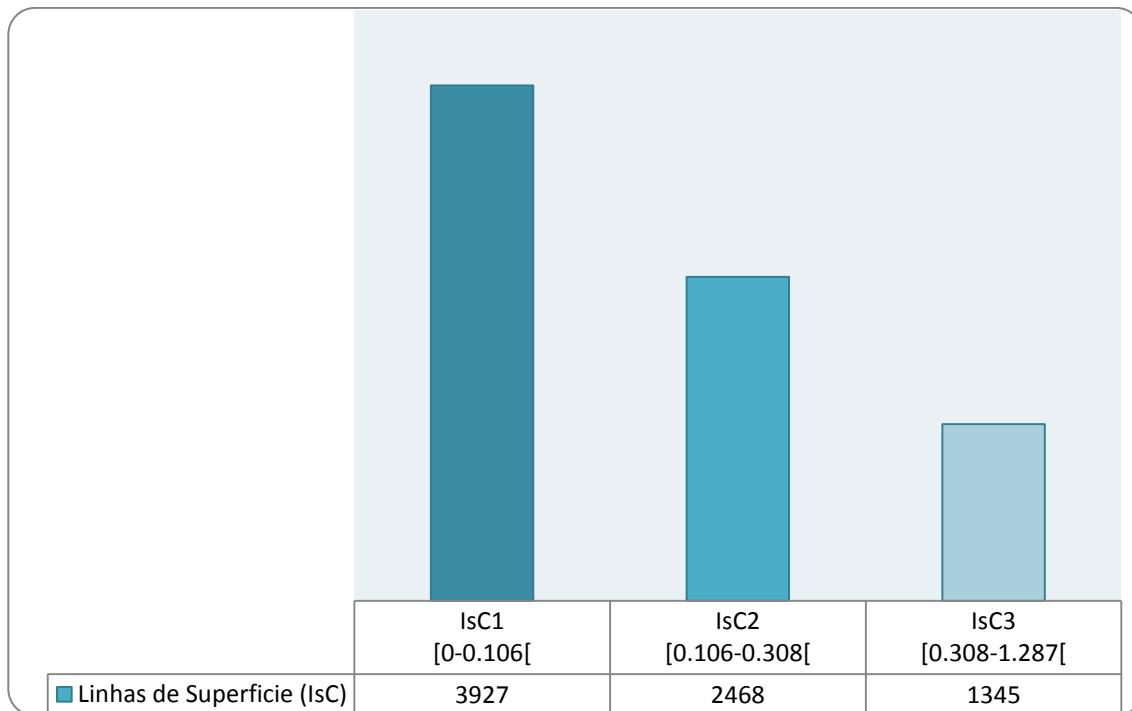


FIGURA 15C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – DENSIDADE DE LINHAS DE SUPERFÍCIE - DISJUNTIVA

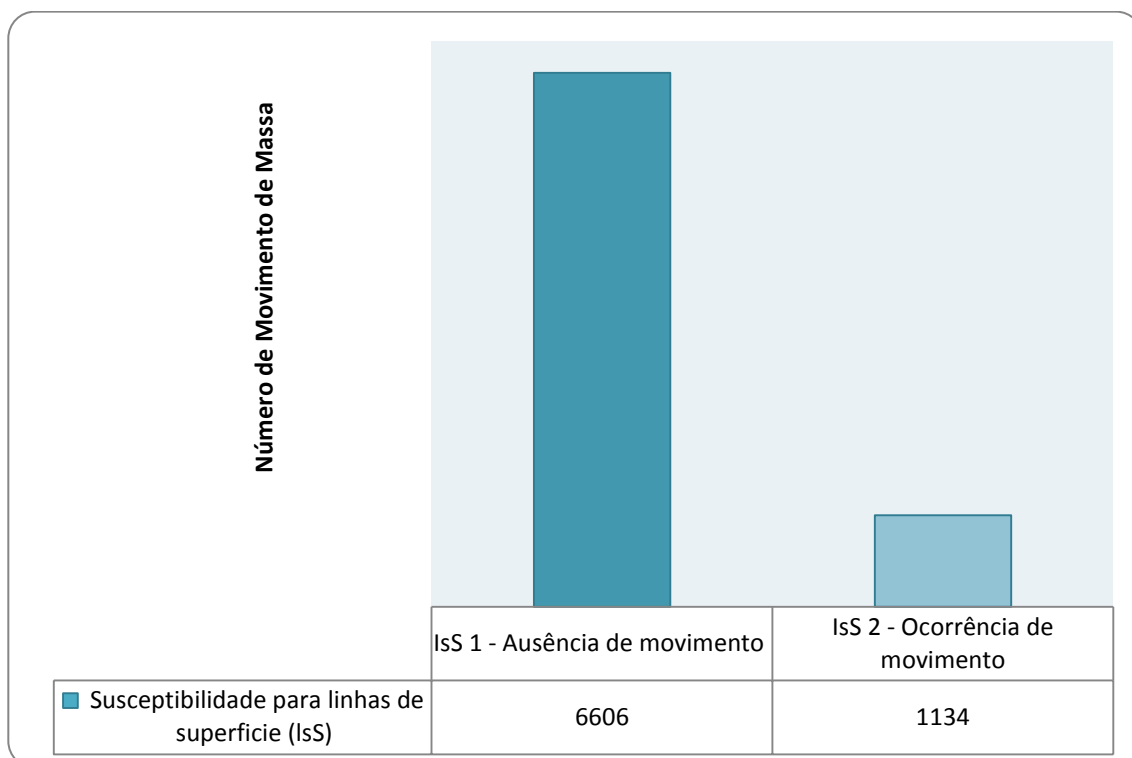


FIGURA 16C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – SUSCEPTIBILIDADE PARA LINHAS DE SUPERFÍCIE

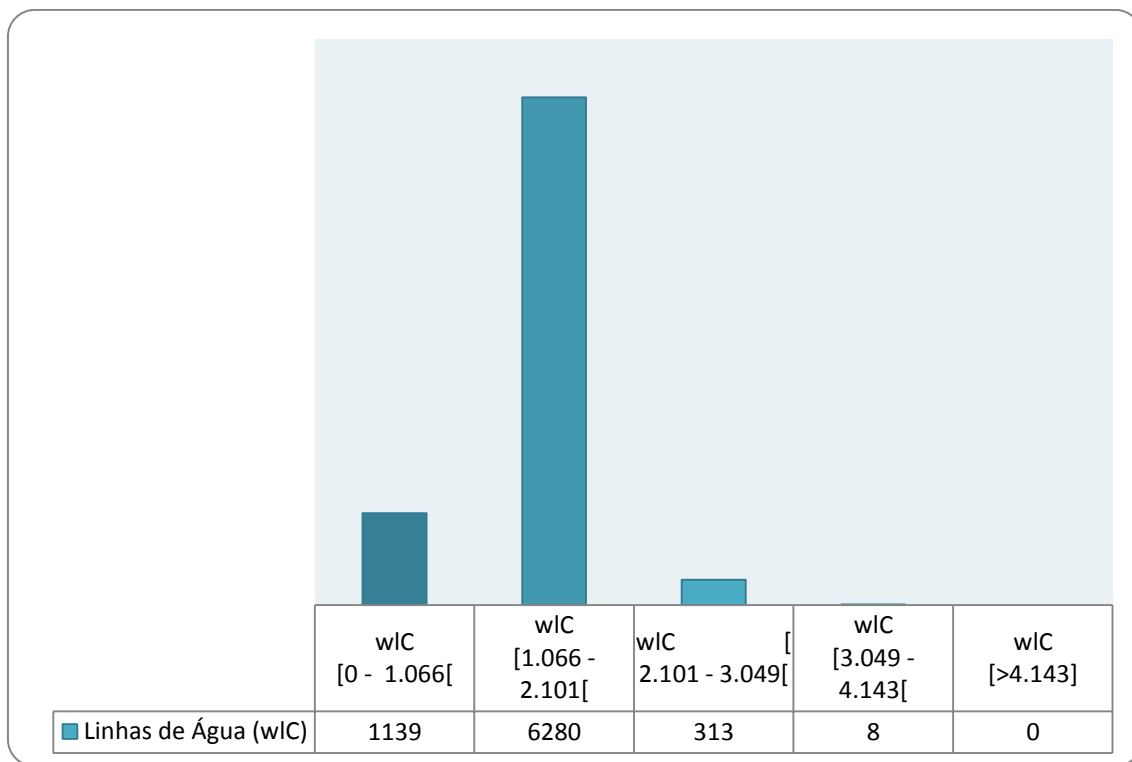


FIGURA 17C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – DENSIDADE DE LINHAS DE ÁGUA

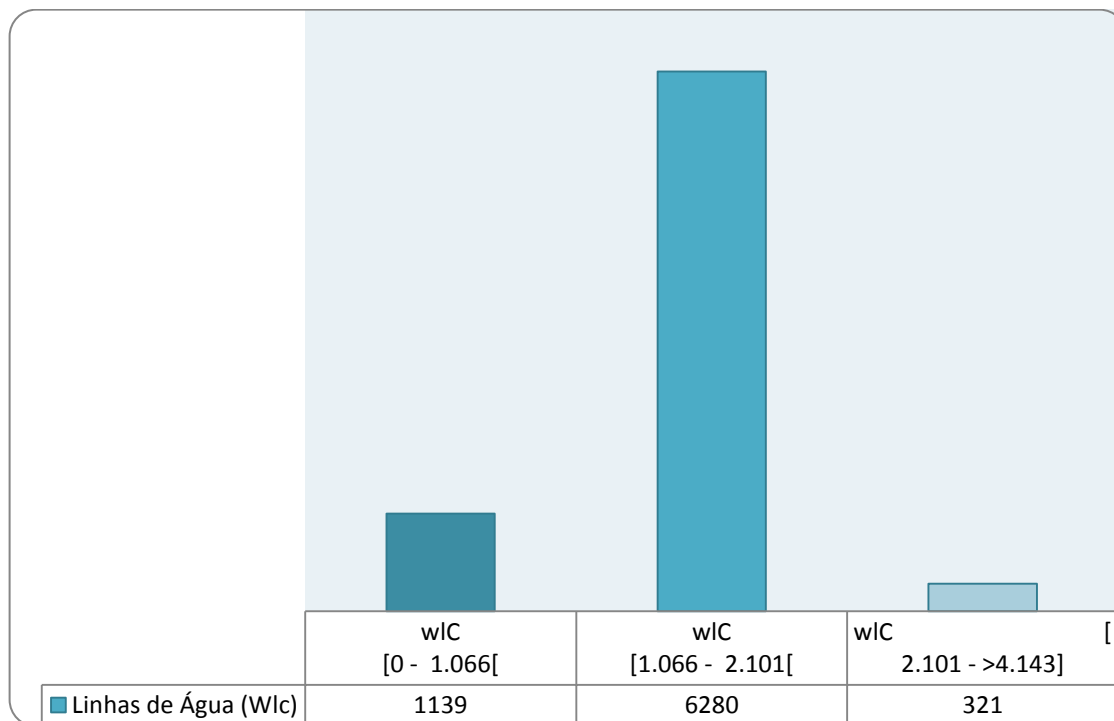


FIGURA 18C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – DENSIDADE DE LINHAS DE ÁGUA - DISJUNTIVA

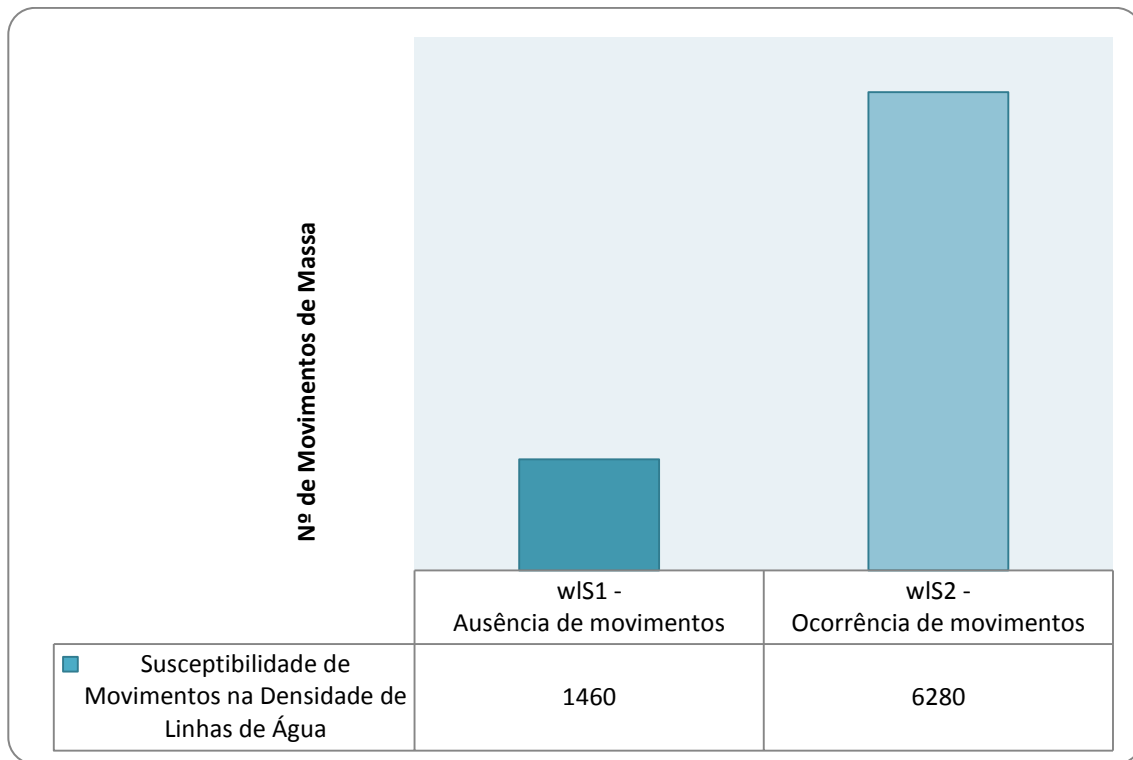


FIGURA 19C – NÚMERO DE MOVIMENTOS DE MASSA – SUSCEPTIBILIDADE DAS LINHAS DE ÁGUA

ANEXO D

Ref: CLME'2011_3615R

MODELOS ESTATÍSTICOS MULTIVARIADOS APLICADOS NO ESTUDO DE MOVIMENTOS DE MASSA NA BACIA HIDROGRÁFICA DE SUSCHIATE (GUATEMALA)

Ricardo Alves^{*1}, Joaquim Góis^{1,2}, Jaime Requena³, O.J. Vásquez Hernández⁴

¹ Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento Eng.. Minas - Porto, Portugal

² Centro de Investiga..o em Geo-Ambiente e Recursos (CIGAR), Porto, Portugal

³ Engenheiro Geólogo, Guatemala

⁴ CUNOR – Centro Universitário do Norte da Universidade de S. Carlos, Guatemala

*Email: mmg08005@fe.up.pt

RESUMO

O presente trabalho teve como motivação a oportunidade de constatar in loco das condições e da realidade sócio-económica que advém à ocorrência de fenómenos naturais que provocam movimentos de grandes quantidades de solos superficiais, com as consequentes elevadas perdas de vidas humanas, animais, destruição de plantações, infra-estruturas, plantações etc...

A elevada frequência de ocorrência de deslizamentos de massas em países de climas tropicais com zonas montanhosas e de elevado índice de precipitação, leva as autoridades nacionais como é o caso da Guatemala, a classificar este tipo de fenómeno “como uma das ameaças mais comuns e mais importantes” e como tal, a requerer um adequado tratamento a todos os níveis, quer políticos quer sociais, quer mesmo incentivando o estudo científico deste tipo de desastres naturais. É pois neste enquadramento que o presente trabalho se insere, procurando, através de uma análise no âmbito da estatística multivariada (preconiza-se como técnica estatística a utilização da Análise Factorial das Correspondências Binárias), contribuir para o esclarecimento das múltiplas interrelações existentes entre as variáveis em estudo e que, acreditamos, são susceptíveis de intervirem na dinâmica dos processos em estudo. A bacia hidrográfica de Suchiate na Guatemala, com uma área de cerca de 1.400 km², composta essencialmente por rochas vulcânicas do Terciário e Quaternário. Fluxos de riolitos, tobas, basaltos e pomes constituem aquelas unidades principais, produto da actividade do vulcão de Tajumulco. Os depósitos mais recentes são sedimentos derivados das rochas acima referidas, erodidas pela força de correntes fluviais ou actividade vulcânica (fluxos de escombros ou de lodos). A série de planícies de inundação e planícies aluviais podem-se distinguir desde as partes médias da bacia até às mais baixas. Num contexto de grande complexidade geológico/geomorfológico, foram georeferenciados 7740 movimentos de massa tendo-se registado, para cada local de estudo, as variáveis altitude, inclinação, orientação, geologia, geomorfologia, densidade de alinhamentos estruturais e densidade de linhas de água. Para a quase totalidade das variáveis referidas foi ainda possível associar uma variável booleana de susceptibilidade (1 – ocorrência de movimento; 0 – ausência de movimento). Considerando que a matriz de dados inicial continha variáveis de diferentes naturezas (haja em vista as métricas em que se exprimem, por exemplo, a variável “altitude”, medida numa escala intervalar ou a variável “geologia”, medida numa escala nominal), foi necessário assegurar uma igualdade de estatuto das variáveis através de uma prévia codificação dos dados de partida.

Seja Q o número total de variáveis e rj o número de modalidades em que se subdivide a variável de ordem j, o número total de colunas da matriz de dados (leia-se o número total das

modalidades das Q variáveis) . dado por:

$$p = \sum_{j=1}^Q r_j$$

Se designarmos agora por X a matriz de n linhas (n indivíduos ou amostras) por p colunas (p modalidades, preenchida em termos de presença - ausência através da seguinte codificação binária;

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 - \text{se o indivíduo } i \text{ ocorre na modalidade } j \\ 0 - \text{no caso contrário} \end{cases}, \quad \forall x_{ij} \in X$$

é possível construir o quadro de descrição lógica (matriz codificada em disjuntiva completa) representado pela Tabela 1. Este sistema de codificação assegura que, seja qual for a natureza das variáveis, a soma em linha dos valores que surgem na tabela é constante e igual ao número de variáveis Q, o que se traduz numa homogeneidade estatística necessária para o processamento subsequente [Garcia Pereira, 1990].

Tabela 1. Excerto da matriz de dados codificada em disjuntiva completa e objecto de posterior tratamento Estatístico Multivariado via Análise Factorial das Correspondências Binárias.

Variável	Altitude			Inclinação		Susc. Inclinação		...	Geologia			Susc. Geológica	
Modalidades → Amostras ↓	zc1	zc2	zc3	iC1	iC2	iS1	iS2	...	geC1	geC2	geC3	geS1	geS2
m1	0	1	0	0	1	1	0	...	0	0	1	1	0
m2	0	1	0	0	1	0	1		0	0	1	1	0
m3	0	1	0	1	0	1	0		0	0	1	1	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
m7738	0	0	1	0	1	0	1		0	0	1	1	0
m7739	0	0	1	0	1	1	0		0	0	1	1	0
m7740	0	0	1	1	0	1	0	...	0	0	1	1	0

Os resultados obtidos, consubstanciados aqui no gráfico bidimensional (planos factoriais da Figura 1) permitem com base em critérios topo-morfológicos de proximidade afastamento visualizar não só o sistema de relações no interior de cada um dos conjuntos formados pelas modalidades (colunas da matriz) ou pelas amostras (linhas da matriz), mas também os sistemas conjuntos existentes entre modalidades e as amostras analisadas.

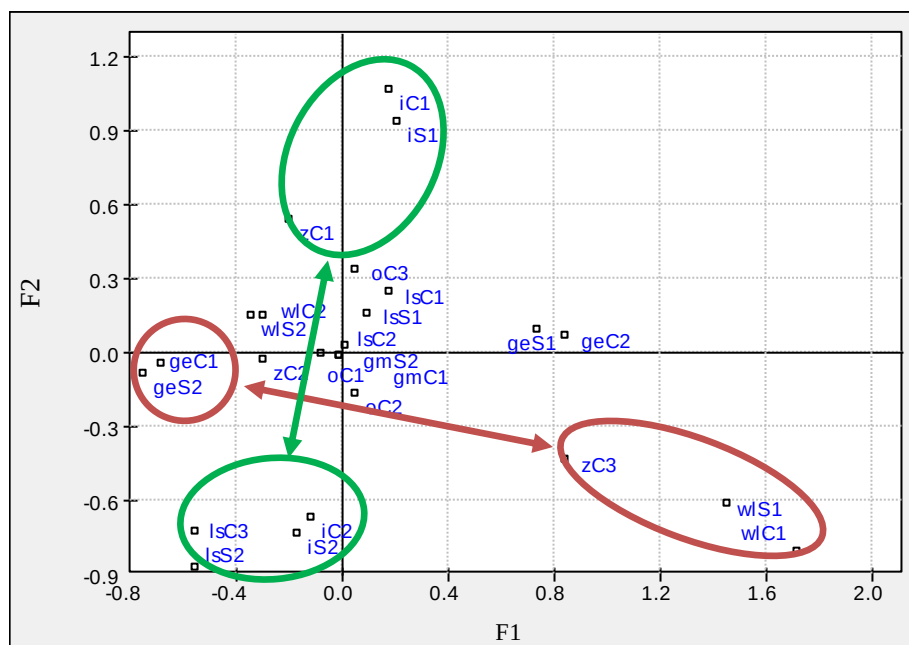


Figura 1. Análise Factorial das Correspondências Binárias, plano factorial 1,2 .

REFERÊNCIAS

Pereira, H. G., & Sousa, A. J. (1988). Análise de Dados para Tratamento de Quadros Multidimensionais. Lisboa: Centro de Valorização de Recursos Minerais.