

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM  
TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR  
FÖLDRAJZ- ÉS FÖLDTUDOMÁNYI INTÉZET

TERMÉSZETFÖLDRAJZI TANSZÉK

**VULKÁNI TÖRMELÉKLAVINÁK  
ELEMZÉSE DOMBORZATMODELLEK  
ALAPJÁN**

**DIPLOMAMUNKA**

Készítette:

**FABÓ DORINA**  
GEOLÓGUS MSC

Témavezető:

**DR. TELBISZ TAMÁS**  
EGYETEMI DOCENS

**Budapest**

**2022**

# NYILATKOZAT

Név: Fabó Dorina

ELTE Természettudományi Kar, szak: Geográfus MSc

NEPTUN azonosító: K3DRR8

Diplomamunka címe:

Vulkáni törmeléklavinák elemzése domborzatmodellek alapján

A **diplomamunka** szerzőjeként fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy a dolgozatom önálló szellemi alkotásom, abban a hivatkozások és idézések standard szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

Budapest, 2022. május 16.

*Fabó Dorina*

---

*a hallgató aláírása*

## Tartalomjegyzék:

I. Bevezetés .....	5
II. Kutatástörténet: vulkáni törmeléklavinák .....	6
<i>II.1. Kialakulásuk</i> .....	6
<i>II.2. Formakincsük</i> .....	11
III. Módszertan.....	15
<i>III.1 Alap adatok</i> .....	15
<i>III.2 Elsődleges feldolgozás</i> .....	16
<i>III.3 Vizsgálati módszerek</i> .....	19
<i>III. 4 Weblap készítése</i> .....	23
IV. Mintaterületek bemutatása.....	25
<i>IV.1 Iriga</i> .....	25
<i>IV.2 Parinacota</i> .....	27
<i>IV.3 Mt. Shasta</i> .....	30
V. Eredmények.....	32
<i>V.1 Iriga</i> .....	32
<i>V.2 Parinacota</i> .....	38
<i>V.3 Mt. Shasta</i> .....	45
<i>V.4 Weblap bemutatása</i> .....	57
VI. Diskusszió .....	59
VII. Következtetések .....	62
VII. Összefoglalás .....	64
VIII. Summary .....	66
IX. Köszönetnyilvánítás .....	68
Irodalomjegyzék.....	69

<b>Internetes hivatkozások .....</b>	<b>72</b>
--------------------------------------	-----------

## I. Bevezetés

A BSc-n elkészített szakdolgozatom a vulkanizmusról szólt és már akkor is nagyon érdekelt ez a tudományág, ezért is szerettem volna ezt a vonalat tovább vinni a jelen tanulmányban. Továbbá a választott szakirányom a geoinformatika, ezért ezt a két tudományágot szerettem volna ötvözni a dolgozatomban. Éppen ezért a témavezetőm ajánlására a választásom a vulkáni törmeléklavinákra esett, ugyanis ez a folyamat számos vulkán fejlődése során lejátszódik és a domborzaton is jól kivehető felszínformákat hagy maga után. Ebből adódóan kiválóan lehet ezeket geomorfológiailag vizsgálni akár digitális domborzatmodelleken is, különböző geoinformatikai eszközökkel.

Miután jobban belemélyedtem a szakirodalomba, ki kellett választanom, hogy mely vulkánokat érdemes és lehet geoinformatikai módszerekkel vizsgálni, ugyanis fontos kitétele volt a vizsgálatnak az, hogy a domborzatmodellen is jól látszódnak a vulkáni törmeléklavinák felszínformái. Próbáltam a Föld különböző területeit reprezentáló és eltérő méretű vulkánokat választani, hogy a vizsgálat ne legyen egyhangú. Ezért három teljesen különböző területekről származó vulkánt választottam, ahol a domborzaton is jól kivehetőek az egyes felszínformák. Az első vulkán az Iriga, ami a Fülöp-szigeteken található. A második a Parinacota, ami Bolívia és Chile határán fekszik. A harmadik és egyben utolsó vulkán pedig a Mt. Shasta, ami az Egyesült Államokban található.

A formák morfológiai elemzése mellett vizsgálatom egyik technikai jellegű célja az volt, hogy megvizsgáljam, hogy a törmeléklavina során kialakult dombok lehatárolását miként befolyásolja a módszer, illetve az alapadat. Kétféle módszert használtam: egyrészt a hagyományos manuális lehatárolást alkalmaztam geoinformatikai környezetben, másrészt egy automatizált eljárást, ami úgy keresi a dombokat, mintha „fordított” felszínen, karsztos tájakon fekvő töbrök lennének. Alapadatként pedig egyrészt a 30m felbontású SRTM 1"-es digitális terepmodellt, másrészt egy 10 m-es felbontású LiDAR eljárással készült digitális domborzatmodellt használtam, ez utóbbit csak a Mt. Shasta esetében, mivel csak arról volt elérhető.

Továbbá fontosnak tartottam, hogy az eredményeket egy napjainkban korszerű módon, azaz webtérképen is bemutassam, melyen keresztül eredményeim könnyebben eljuthatnak a téma iránt érdeklődő emberekhez.

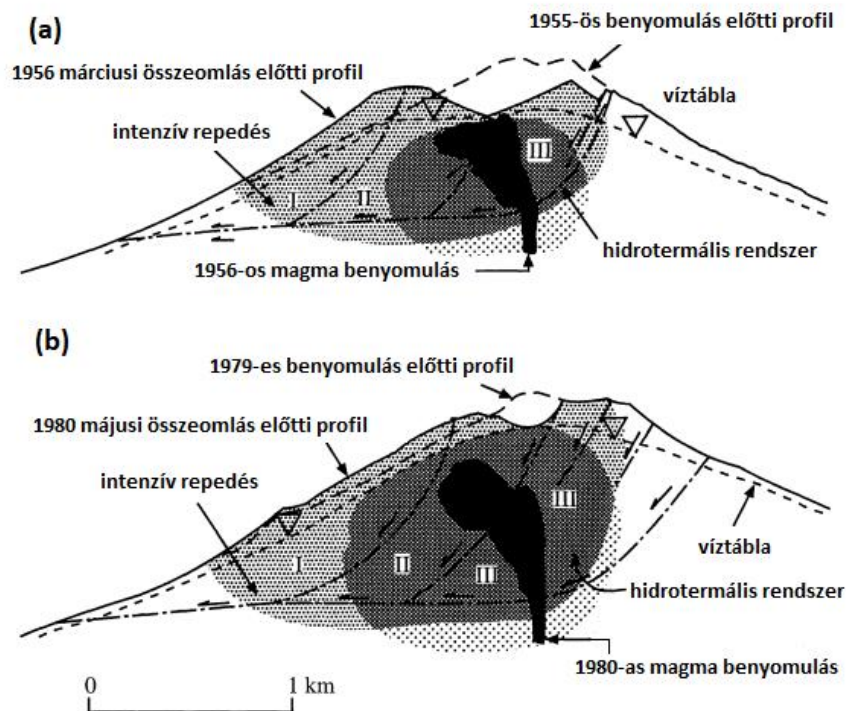
## **II. Kutatástörténet: vulkáni törmeléklavinák**

Nagy törmeléklavinák gyakran alakulnak ki a vulkánok környezetében, azonban a Mount St. Helens 1980-as kitöréséig nem vizsgálták olyan körültekintően ezeket a folyamatokat (GLICKEN, H., 1996). Kezdetben ultravulkáni kitörések folyamataként írták le ezt a jelenséget, azonban a legtöbb ilyen üledéket lahar-lerakodásként értelmeztek, míg más törmeléklavina-lerakódásokat piroklaszt árák üledékének, lávafolyamnak vagy morénának hittek (UI, T. et al., 2015). VAN BEMMELEN, R. W. (1949) pedig úgy gondolta, hogy ezek a folyamatok vulkáni-tektonikus környezetben jönnek létre és két módon keletkezhetnek: vagy lassú oldalirányú elcsúszással, vagy földcsuszamlás illetve lavinaszerű mozgás keretében, melynek során feldarabolódik a csúszó tömeg.

### ***II.1. Kialakulásuk***

A vulkáni törmeléklavinák keletkezését 3 főbb folyamat gerjeszti. Új magma benyomulása, hidrotermális nyomás, valamint földrengések okozhatják a vulkáni törmeléklavinákat (UI, T. et al., 2015). Azonban előfordulhat, hogy a klímaváltozás és vulkáni terjeszkedés is okozhat törmeléklavinákat (GODOY, B. et al., 2017).

Az *1. ábrán* a Bezymianny vulkán (*a*) és a Mt. St. Helens (*b*) látható. Mindkét vulkán esetében egy magma benyomulás gerjesztette a törmeléklavina megindulását. A benyomulás hatására a vulkán belsejében az anyagok megrepedeznek, fluidizált állapotba kerülnek, és ezzel egy időben hidrotermális folyamatok is megindulnak. Ennek következtében az állapot instabillá válik és a vulkán oldalán lavinák indulhatnak meg, akár több részletben is (*1. ábrán* római számokkal jelölve; VOIGHT, B. et al., 2000). REID, M. E. (2004) is hasonlóképp vélekedett, ugyanis a magma benyomulásból származó hő hatására a pórus folyadékok nyomása megnövekszik, ennek köszönhetően pedig megnő a vulkáni anyagban a feszültség. Végeredményképpen pedig összeomlás következhet be.



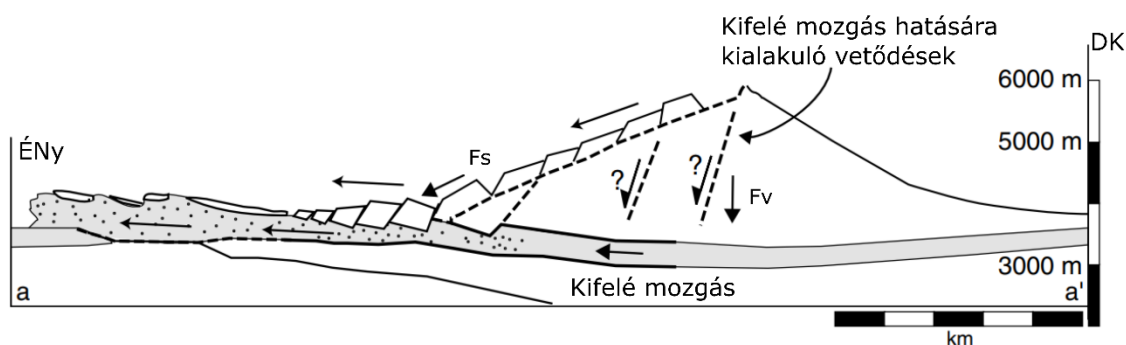
1. ábra: *Sematikus keresztmetszeti ábra a magma benyomulás által gerjesztett törmeléklavina mozgásokról (VOIGHT, B. et al., 2000)*

KEEFER, D. K. (1984) tanulmányában a földrengések által gerjesztett törmeléklavinákat vizsgálta. Kutatása során arra a következtetésre jutott, hogy az anyag elmozdulása szorosan összefügg a mozgási energiával, amit pedig a lejtés befolyásol, ezért a 150 m-nél magasabb és 25°-nál meredekebb lejtőkön alakulhatnak ki törmeléklavinák. Továbbá a lavina kialakulása függ a területet ért fluviális és glaciális eróziótól is. Tehát azon vulkánok oldalán keletkezhetnek törmeléklavinák, amelyek ezeknek a morfológiai jellemzőknek megfelelnek.

Mint említettem vulkáni törmeléklavina kialakulhat a klímaváltozás hatására is. CAPRA, L. (2006) tanulmánya során arra a következtetésre jutott, hogy a pleisztocén és holocén korban bekövetkezett sorozatos összeomlások a glaciális maximum után következtek be, amit pedig az akkori globális felmelegedés okozott. Ugyanis a melegedés hatására a gleccserek olvadnak és erősebben párolognak, illetve a melegedő hőmérséklet miatt a páratartalom és a csapadék amúgyis növekszik. Ennek hatására a kőzetek mállása erősödik, illetve a felszínről beszivárgó víz számos helyen gyengíti a kohéziót, amihez

még hozzájárul az is, hogy a felszín alatti jég kiolvadása szintén konzisztencia-csökkenést okoz. Ezáltal megnő a törmeléklavinák valószínűsége. Ezen elv alapján, úgy gondolom, hogy a most zajló globális felmelegedés is hasonló hatással lehet a ma kialakuló törmeléklavinákra.

Továbbá előfordulhat, hogy a törmeléklavina kialakulását egy vulkán növekedése/terjeszkedése okozza. Ennek a folyamatnak a kulcskérdése az, hogy a vulkán milyen aljzatra épül. Hiszen ha a vulkán *szubsztrátuma* egy „gyenge”, képlékeny kőzetből áll, akkor nem képes „megtartani” a vulkáni építményt. Ez pedig kétféle deformációhoz vezethet: a vulkáni építmény maga szétesik az aljzattal együtt, vagy pedig szétválnak. Ez utóbbi esetben a szubsztrátum „kicsúszik” a kúp alól. Ezt a törmeléklavinát kiváltó okot először a Mombacho vulkánon (Nicaragua) figyelték meg. A 2. ábrán ennek a folyamatnak a szematikusan rajzolt képet láthatjuk. Megfigyelhető, ahogy a „kicsúszás” hatására a vulkáni építmény oldala instabillá válik és szétesik, ennek következtében pedig kialakul a törmeléklavina (VAN WYK DE VRIES, B. et al., 2001).



2. ábra: A szubsztrátum kifelé mozgásából eredő törmeléklavina kialakulása szematikusan ábrán a Socompa vulkán (Argentína) esetén. *F<sub>s</sub>*: csúszásból eredő erő, *F<sub>v</sub>*: gravitációs erő (VAN WYK DE VRIES, B. et al., 2001)

A leírtak alapján arra tudok következtetni, hogy a vulkáni törmeléklavinák kialakulását nem lehet csak egy folyamattal magyarázni. A kialakulásuk bonyolult és összetett folyamat, ahol egyik szegmens gerjeszti a másikat, mint ahogy a magma benyomulása is hidrotermális folyamatokat indít el. Ezt pedig jól bizonyítja a Mt. St. Helens 1980-as kitörése, ahol bebizonyították, hogy az összeomlást több folyamat is generálta. Először egy 5-ös magnitúdójú földrengés keletkezett, ennek hatására több



freatikus robbanás alakult ki, majd a középén található kriptodóm összeomlott (GLICKEN, H., 1996, UI, T. et al., 2015, CAPRA, L. 2006).

A vulkáni környezetben kialakult törmeléklavinák nagyon változatos folyamatok során keletkezhetnek, ennek ellenére a kitörés típusuk alapján három csoportba sorolhatók. SIEBERT, L. (1984) kezdetben két típust különböztetett meg a *Bezymianny típusút* és a *Bandai típusút*. UI, T. et al. (2015) a későbbiekben hozzáadtak egy új csoportot az *Unzen típusú*. A Bezymianny típusról akkor beszélünk, ha a vulkanizmust hosszan tartó szeizmikus és/vagy prekursor eruptív tevékenység jellemzi, és gyakran keletkeznek az újonnan kialakított lópatkó alakú kalderán belül lávadómok vagy központi kúpok. A Bandai típust freatomagmás tevékenység jellemzi és még mielőtt a kitörési tevékenység bekövetkezne, az építmény elpusztul, ezért is nem találhatók juvenilis anyagok az üledékében. Az Unzen típusnál nem a vulkáni tevékenység a lényeg, hanem hogy egy földrengés váltja ki a lavinát.

A lavinák mozgására többféle modellt is kidolgoztak már a tudósok. Mivel diplomamunkám nem a lavinák mozgásáról szól, ezért csak néhány modellt szeretnék bemutatni, hogy mégis el tudjuk képzelni miként is működnek ezek a folyamatok. Minden modell alapvetése, hogy a lezúduló anyag valaminek a hatására (levegő, víz, finom szemcsés por) „fluid” állapotba kerül, ezzel megkönnyítve a törmeléklavina mozgását.

Az egyik ilyen *mechanikus fluidizációs modellt* a légpárnás járművek működésének elvéhez hasonlítják. Eszerint a törmeléklavina alatt nagy nyomású levegő keletkezik, így az alacsonyabb nyomású külső levegőhöz viszonyított nyomáskülönbség miatt „megemelkedik” a törmeléklavina, és így könnyebben lezúdul. Egy másik modell a *szemcseáramlás-elméletén* alapszik, ami egy szemcseközi folyadék jelenlétét feltételezi és a nagy energiájú intersticiális porral együttesen csökkentik a szemcsékre nehezedő nyomást és emiatt a súrlódási ellenállást is. Egy harmadik modell szerint pedig a fluidizációt közvetetten a felszabaduló esési energia és a megfelelő frekvenciájú erős hanghullámok terjedése okozza (UI, T. et al., 2015).

A vulkáni törmeléklavinák mozgásának egyik jellemzője a *H/L arány*, ahol H a relatív szintkülönbség, L pedig a lavina maximális megtett távolsága. Ennek az aránynak az értéke mindenféle (tehát nem vulkáni eredetű) törmeléklavinákat is figyelembevéve

általában 0,2 és 0,06 között mozog, azonban a vulkáni törmeléklavinák esetén ez az érték alacsonyabb. Ennek valószínű oka pedig az, hogy az összeomlásos folyamat közben a vulkán belsejében a kőzetek hidrotermálisan megváltoznak (SIEBERT, L., 1984, UI, T. et al., 2015). Továbbá a megtett távolság és a függőleges lejtés kapcsolata befolyásolja a lavinák mozgási jellemzőit is, és e folyamatok sebessége akár el is érheti a 100 km/h-t (SIEBERT, L., 1984).

<b>Vulkáni törmeléklavinák jellemzői</b>						
<b>Vulkán</b>	<b>Üledék</b>	<b>Magasság (km)</b>	<b>Megtett távolság (km)</b>	<b>Térfogat (km<sup>3</sup>)</b>	<b>Kitörés típus</b>	<b>Vulkán típus</b>
Unzen	1792	0,7	6	0,48	U	D
Yatsugatake	Nirasaki	2,4	32	9	-	S
Tateshina	Otsukigawa	1,4	12,5	0,35	-	S
Asama	Tsukahara	1,8	20	2	-	S
Bandai	1888	1,2	11	1,5	Ba	S
Chokai Kisakat	2,2	25	3,5	Ba?	S	
Tashiro-dake	Iwasegawa	0,7	8,8	0,55	-	S
Komagatake	1640	1,2	15	1,1	Bz	S
Usu	Zenkoji	0,5	6,5	0,3	Ba?	S
Taranaki	Pungarehu	2,6	31	7,5	-	S
Papandayan	1772	1,5	11	0,14		
Iriga	1628?	1,1	11	1,5	-	S
Banahao	Lucena and Lucban	1,7	26	5	-	S
Bezymianny	1956	2,4	18	0	8 Bz	S
Shiveluch	1964	2	12	1,5	-	S
Mt. St. Helens	1980	2,55	24	2,5	Bz	S
Shasta	300–360 kyr B.P.	3,55	50	26	-	S
Chaos Crags	ca, 1650	0,65	5	0,15	-	D
Citlaltépetl	Teteltzingo	4	85	1,8	L	S
Colima	Nevado de Colima	4,3	120	22–33	L	S
Socompa	Holocene	3	35	15	Bz	S
Rainier	Osceola	4,7	120	3,8	L	S

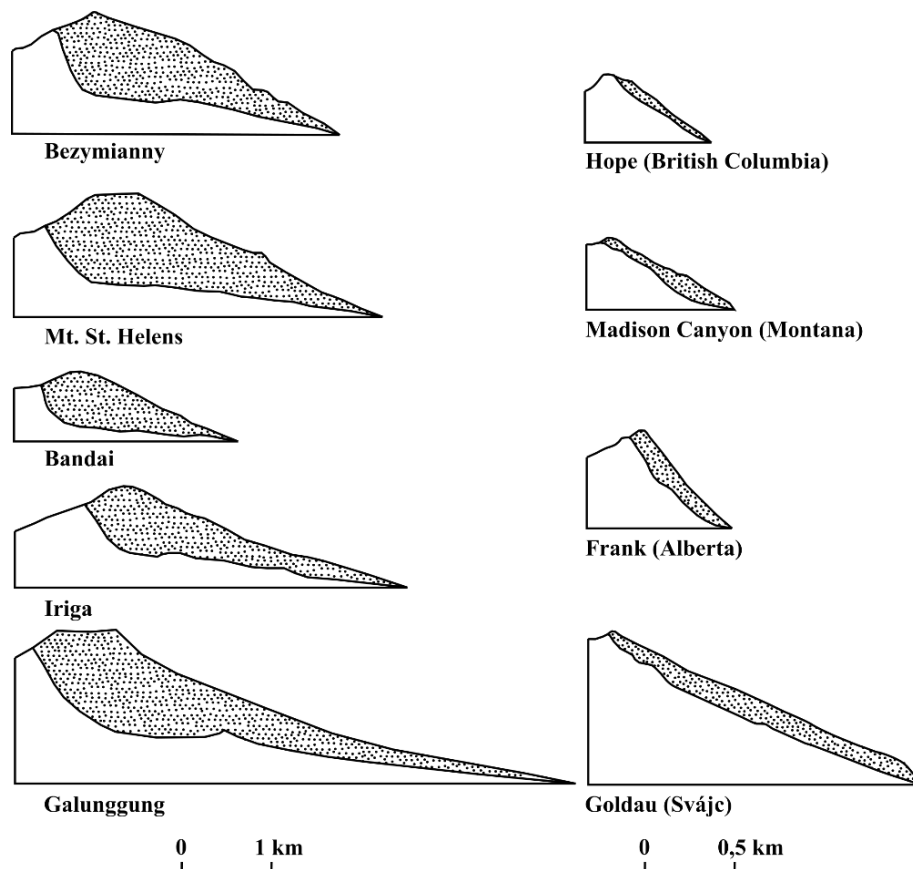
Rövidítések : Bz: Benzymianny típusú; Ba: Bandai típusú; U: Unzen típusú; L: hosszan kifutó törmeléklavina; S: rétegvulkán; D: lávadóm

1. táblázat: *Vulkáni törmeléklavinák jellemzői. Adatforrás: UI, T. et al., 2015*

Az 1. táblázatban néhány híresebb törmeléklavina paramétereit láthatjuk. A Colima és Citlatépetl vulkánok (Mexikó) hosszú kifutását az okozta, hogy szállítódás közben a törmeléklavina átalakult agyagban gazdag laharrá (U1, T. et al., 2015).

## II.2. Formakincsük

A vulkáni törmeléklavinák kialakulásuk során jellegzetes patkó alakú bemélyedése, úgynevezett *patkó alakú kalderák* keletkeznek a kitörési központban. Ezeket a felszínformákat, pedig könnyen el lehet különíteni az beszakadásos kalderáktól. Ez alapvetően azért fontos, mert kezdetben a kaldera formájából tudtak következtetni a törmeléklavinákra. Az beszakadásos kalderák átmérője átlagosan 6 km, míg a törmeléklavina kalderák átmérője 2 km és mélységük jóval nagyobb az előbb említett kalderákétól (SIEBERT, L., 1984), továbbá erősen aszimmetrikusak.



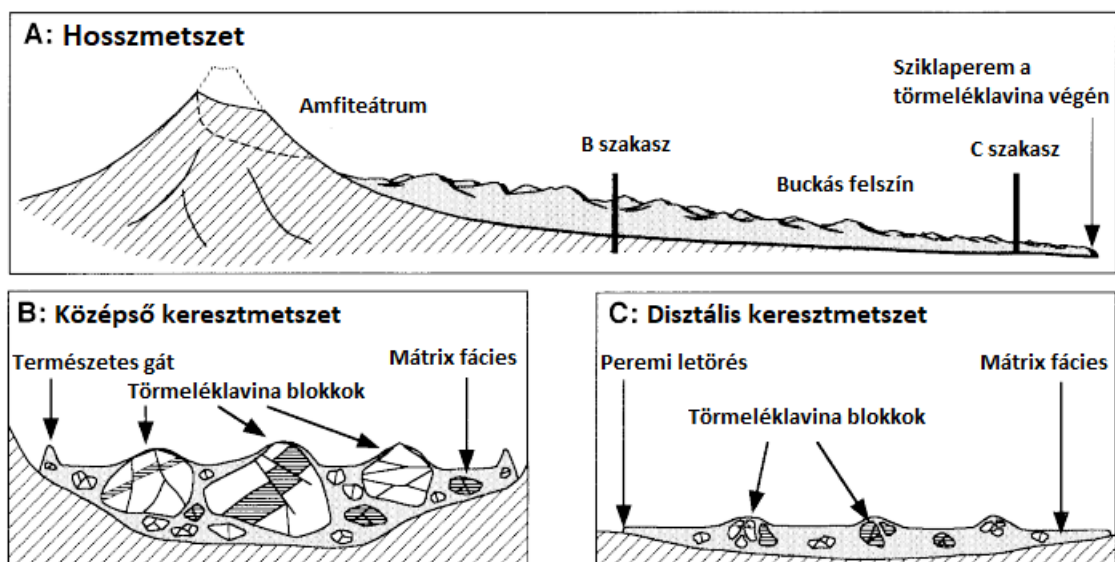
3. ábra: A nem vulkáni és vulkáni eredetű törmeléklavinák által kialakított mélyedés keresztmetszeti összehasonlítása. A pöttyözött rész az elszállított anyagot jelzi.

(SIEBERT, L., 1984)

A 3. ábrán az nem vulkáni eredetű törmeléklavinák („hegycsuszamlások”) által okozott karéjos bemélyedések és a vulkáni törmeléklavina kalderák keresztmetszetét láthatjuk. A képen jól látható a mélység különbség. A törmeléklavinák esetén viszonylag magas oldalfal alakul ki és a kaldera „padlója” enyhén lejt. Ezzel ellentétben a nem vulkáni eredetű törmeléklavinák csúszópályája jóval meredekebb (SIEBERT, L., 1984).

A vulkáni törmeléklavina során létrejött üledéket dombos felszín jellemzi, amelynek kiemelkedései nagyon változatosak és szabálytalan alakúak lehetnek, ezért nehéz megmondani csak a topográfiáról a keletkezésük módját. Kezdetben a törmeléklavinák formakincsét glaciális folyamatok formakincsének hitték, ugyanis formái és összetételbeli szabálytalanságaik nagyon hasonlóak (UI, T. et al., 2015). Továbbá a törmeléklavina-lerakódások nem összekeverendők a piroklaszt árák üledékeivel sem, noha az utóbbiak is hasonló „buckás” felszín eredményezhetnek, azonban a törmeléklavinák üledékei sokkal gyengébben osztályozottak és lényegesen nagyobb méretű blokkok is találhatóak bennük (SIEBERT, L., 1984).

A vulkáni környezetben kialakult törmeléklavinák lerakódását két fácies jellemzi, a *törmeléklavina blokkok* és a *törmeléklavina mátrix* (lásd. 4. ábra; UI, T. et al., 2015). Ezt a gyakorlatban úgy kell elképzelni, hogy a viszonylag homogén összetételű nagy



4. ábra: A vulkáni törmeléklavina üledékének lerakódása sematikus ábrán. (UI, T. et al., 2015)

tömböket veszi körül a hasonló anyagokból álló finomabb szemcsés mátrix anyag. Az általános törmeléklavinákhoz hasonlóan a vulkáni törmeléklavinák morfológiájában is találhatunk a lavina szélein kialakult *természetes gátakat* (lásd 4. ábra), valamint hosszanti és keresztirányú gerinceket (SIEBERT, L., 1984). Ezek a gátak akár több 10 méter magasra is megnőhetnek. Az Unzen vulkán (Japán) esetében például 40 méter magas gátak alakultak ki a törmeléklavina szélén. Továbbá a 4. ábrán látható még az *elvégződésnél*, illetve a *peremeknél kialakuló sziklás letörés (distal cliff, ill. marginal cliff)*, ami törmeléklavina üledék szélein jellemző forma (UI, T. et al., 2015).

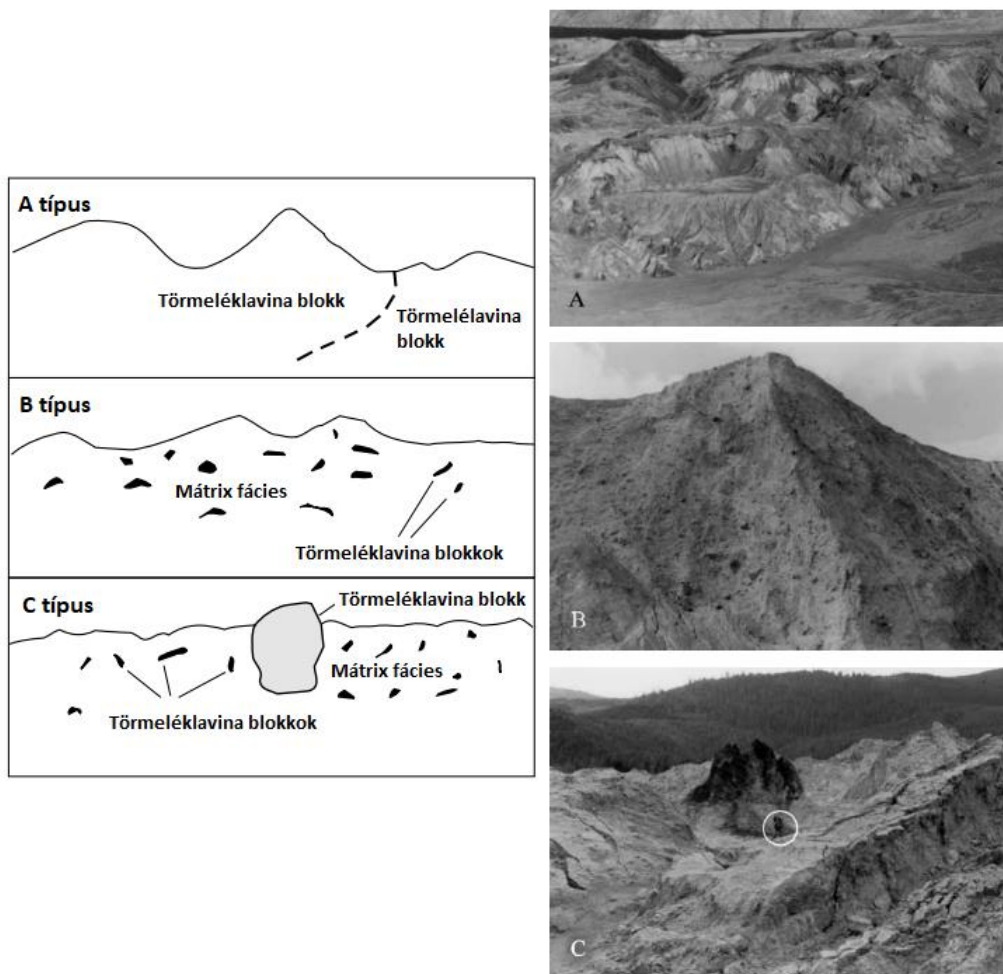
A törmeléklavinák felszínén keletkező dombok (amik tulajdonképpen a törmeléklavina blokkok) száma száztól akár a több ezerig is terjedhet, magasságuk pedig elérheti a 200 métert is (SIEBERT, L., 1984). A Ten Thousand Hills of Tasikmalaya néven ismert terület a Galunggung vulkánnál (Jáva) található, ahol 3648 darab ilyen vulkáni törmeléklavinából származó dombot számoltak (ESCHER, B. G., 1925). Ahol a törmeléklavina terjeszkedését nem gátolja semmi (pl. völgy), ott ezeknek a domboknak a sűrűsége megnövekedhet a szélek felé és kisebb alapterületű, de magasabb dombok jönnek létre (SIEBERT, L., 1984).

Logikusan azt gondolnánk, hogy a dombok hossz tengelye a lefolyás irányával párhuzamosan rendeződik, azonban ezt eddig nem sok vulkáni törmeléklavina esetén sikerült megállapítani. Ebből adódóan nem lehet általános tendenciaként elmondani ezt a tényt (UI, T. et al., 2015).

A vulkáni törmeléklavina blokkok elsődleges textúrája és geológiai szerkezete a vulkáni anyagból származik. Gyakran előfordul, hogy a lavina mozgása során az alapjalzathoz is feltép darabokat, amelyek általában kisebbek, mint a vulkáni eredetű blokkok (UI, T. et al., 2015). Több tanulmány is említést tesz az úgynevezett *toreva blokkokról*, amelyek a törmeléklavina üledékén belül vagy a lábánál található nagy, ferde és elforgatott blokkok (GODOY, B. et al., 2017, PAGUICAN, E. M. R. et al., 2014). Sok esetben, az üledékben úgynevezett *jigsaw blokkokat* (melyek darabjai kirakósként összeilleszkednek) vélnek felfedezni a kutatók, ami arra utal, hogy a törmelékek eltörték, de a töredékek már nem szóródtak szét (GLICKEN, H., 1996).

A vulkáni törmeléklavina mátrix anyaga törmeléklavinatömbök ütközésével és feldarabolódásával jön létre. Az összetétele azonban sokkal változatosabb, mint a blokkoké. Egyrészt a vulkáni töredékek keverékéből áll, amelyek a forrásvulkán különböző részeiből származnak. Másrészt a lefolyás során felvehet fluviális üledékeket, a talajrétegek anyagát és az aljzati kőzeteket is (UI, T. et al., 2015).

GLICKEN, H. (1996) a Mt. St. Helens 1980-as kitörése kapcsán osztályozta a törmeléklavinák üledékeit és azokat kialakulásuk alapján csoportokra bontotta. Az üledékek kapcsán három csoportot hozott létre (A, B C típus) aszerint, hogy miként viszonyul a mátrix fácies a blokk fácieshez. Az *A típusú* (5. ábra) üledékben a blokkok egymás mellett helyezkednek el és nincs köztük mátrix anyag. A *B típusra* (5. ábra) az jellemző, hogy szinte csak a mátrix anyagból áll, azonban előfordulhat, hogy elszórtan



5. ábra: Törmeléklavina üledékeinek osztályozása sematikus ábrán (bal), illetve terepi fotókon a Mt. St. Helens-nél (jobb) (GLICKEN, H., 1996)

lerakódnak benne kisebb blokkok. A *C típus* (5. ábra) pedig nagyobb blokkokból áll, amiket körülvesz a mátrix anyaga. A törmeléklavinák üledékeinek általában ez a leggyakoribb megnyilvánulása, azonban ez a Mt. St. Helens esetén ez nem érvényesül. A Mt. St. Helens keleti oldala nagyrészt A típusú üledékből áll és talán ez mondható a leggyakoribbnak a területen.

A dombos felszín kialakulását szintén három csoportra osztotta. Az *1. mechanizmus* esetén egy sasbércekből és árkokból álló rendszer alakul ki, ami az A típusú üledék esetén a legszembetűnőbb. Az áramlási iránnyal párhuzamos hossz tengelyű dombok, amint a lavina lapos felszínhez ér oldalirányban elcsúsznak. A *2. mechanizmus* esetén előfordul, hogy a rendkívül nagy blokkok az áramlási iránnyal keresztbe rendeződnek. A *3. mechanizmus* esetén a törmeléklavina aljzata és oldala nyíró feszültségnek van kitéve és további két csoportra osztható (3A, 3B). A *3A mechanizmus* is az áramlási iránnyal párhuzamos hossz tengelyű dombokat hoz létre, ugyanis az alapi nyírás lassítja a lavina magasabb sűrűségű anyagát, amikből lesznek ezek a hosszan elnyúló dombok. A *3B mechanizmus* random irányú hossz tengelyű dombokat eredményez, ugyanis a Mt. St. Helens nyugati részén fák is bekerültek a törmeléklavinába, amikor pedig lassult a lavina sebessége a fák akadályt képeztek a blokkoknak ezért nem tudtak párhuzamosan rendeződni (GLICKEN, H., 1996).

### **III. Módszertan**

#### ***III.1 Alap adatok***

Egyrészt az Earth Explorer oldaláról ([www.earthexplorer.usgs.gov](http://www.earthexplorer.usgs.gov)) 30 m-es felbontású SRTM domborzatmodellt töltöttem le mindhárom általam vizsgált vulkáni törmeléklavina területéről (Iriga – Fülöp-szigetek, Parinacota - Bolívia, Mt. Shasta - USA), másrészt pedig LiDAR felvételezésen alapuló domborzatmodellt a USGS honlapjáról ([www.apps.nationalmap.gov/viewer](http://www.apps.nationalmap.gov/viewer)) 10 m-es felbontásban a Mt. Shasta területéről.

Az *SRTM* (Shuttle Radar Topography Mission) adatbázis egy NASA projekt keretein belül jött létre, 2000 februárjában az Endeavour űrrepülőgép végzett radar-interferometriás méréseket 11 napon keresztül. Az említett űrrepülőgép pályainklinációja

57° volt, ebből adódóan a 60°-os északi, illetve az 57°-os déli szélességi körök közötti területről sikerült méréseket készíteni. A mért adatokhoz különféle előfeldolgozási eljárások szükségesek (geokorrekción, szűrések), azonban ezeket a folyamatok elvégzik helyettünk és a már feldolgozott SRTM adatok tölthetők le az internetről (TELBI SZ T. et al., 2013).

A *LiDAR* (Light Detection And Ranging) felvételezésen alapuló felszíni térképezés az egyik legpontosabb módszer a domborzatmodellek elkészítéséhez. Ez az eljárás a radartól annyiban tér el, hogy a rádióhullámok helyett lézervény (UV, látható vagy közeli infravörös hullámhosszú) kibocsátásával és visszaverődésével detektálja a felszínt. A rövid hullámhossznak köszönhető a módszer pontossága. Leggyakrabban repülőgépre telepített lézerszkenner segítségével végzik a méréseket, és hogy koordinátákat is hozzáadjanak az adatokhoz, GPS-t is használnak (TELBI SZ T. et al., 2013).

Az adatok letöltésekor eltérőek voltak a vetületek és dátumok, azonban ezeket átkonvertáltam, hogy egységesek legyenek. Az általam alkalmazott vetület az UTM, az ellipszoid pedig a WGS84 volt, ehhez pedig részben szükségem volt a Global Mapper szoftverre. Az adatok kezelésére, elemzésére és megjelenítésére az ArcGIS ArcMapP szoftverét használtam, a rózsadiagramok szerkesztéséhez pedig a Golden Software Grapher szoftverét alkalmaztam. Továbbá segítségemre volt az Inkscape szoftver a képek szerkesztésében.

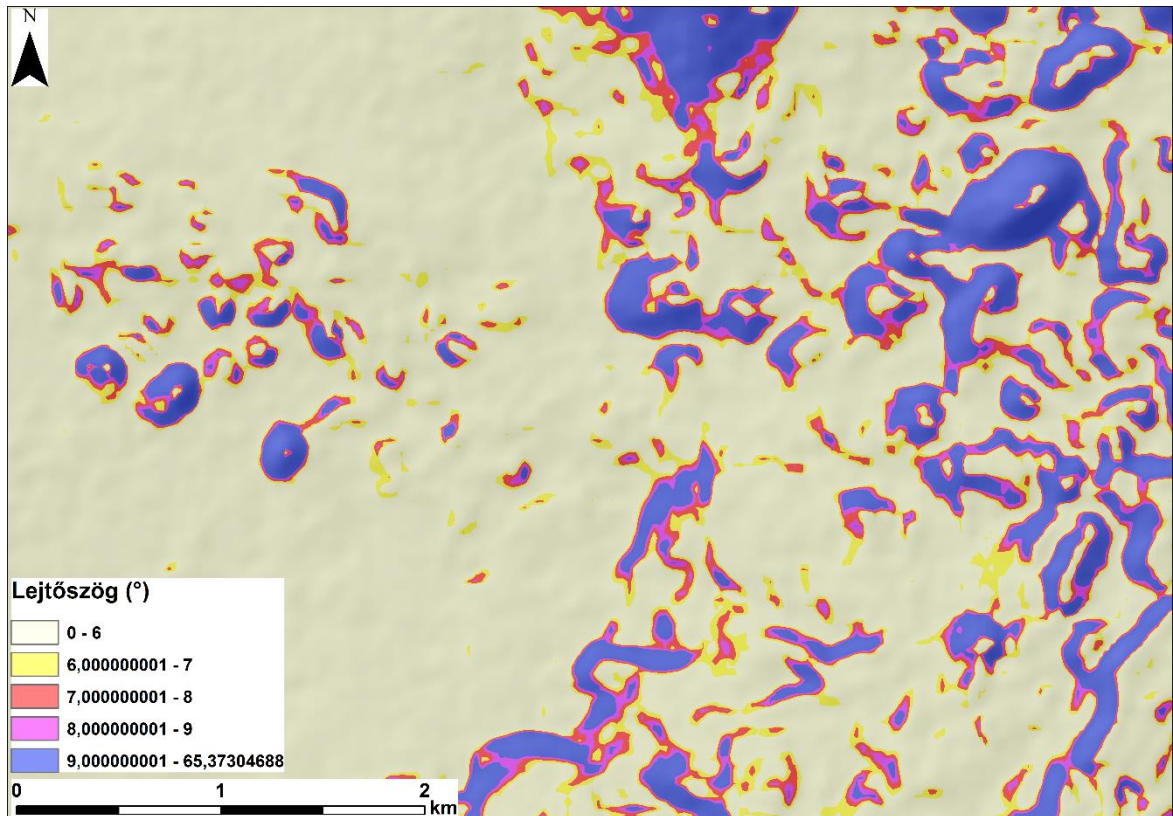
### ***III.2 Elsődleges feldolgozás***

A letöltött adatokon előkészítő eljárásokat kellett végrehajtanom az ArcMap segítségével. A manuális lehatároláshoz először minden területről készítettem egy domborzatárnyékolt térképet a „Hillshade” eszköz segítségével. Az alapértelmezett beállításokkal dolgoztam, tehát a napsütés iránya ÉNy-irányból 315° volt, a magassági szög pedig 45°. Az árnyékolás miatt a domborulatok jobban kivehetőek voltak a térképeken, ezért nagy segítségemre volt a kézi lehatárolásban.

A következő lépésben szükségem volt egy lejtőszög térképre, amit a „Slope” eszköz segítségével készítettem el. Ez az eszköz 3x3-as „cellaablakok” segítségével számolja ki a meredekséget, azaz a  $z$  érték változásának mértékét. A lehatároláshoz olyan



megjelenítést használtam, ami kiemeli a 6°, 7°, 8° és 9° meredekségű cellákat, továbbá beállítottam, hogy a megjelenítés ne négyzetes legyen, hanem szép „sima átmenetű”. Ezt a bilineáris interpoláció beállításával értem el és a domborzatárnyékolt térképnél is ezt a



6. ábra: A manuális lehatároláshoz használt térképi megjelenítés a Parinacota (Bolívia) területén szemléltetve SRTM alapján

beállítást használtam. Az 6. ábrán azt az állapotot láthatjuk, amivel a manuális lehatárolás során dolgoztam.

Továbbá hasznos kiegészítés volt a dombok lehatárolás során a szintvonalas térkép is, amit a „Contour” eszköz segítségével készítettem 1 m-es szintvonalközzel. A Mt. Shasta esetén, azonban nagyobb szintvonalközt (2 m) kellett választanom, ugyanis az ArcMap-ben a kimeneti fájlok mérete nem haladhatja meg a 2 GB-ot.

Az automatizált lehatárolás előkészítése során 4 különböző eljárást kellett elvégezni, hogy a modellek jól lefussanak. 0. lépésként először ki kellett vágnom a domborzatmodellből a törmeléklavinák területét. Ehhez a „Extract by Mask” eszközt

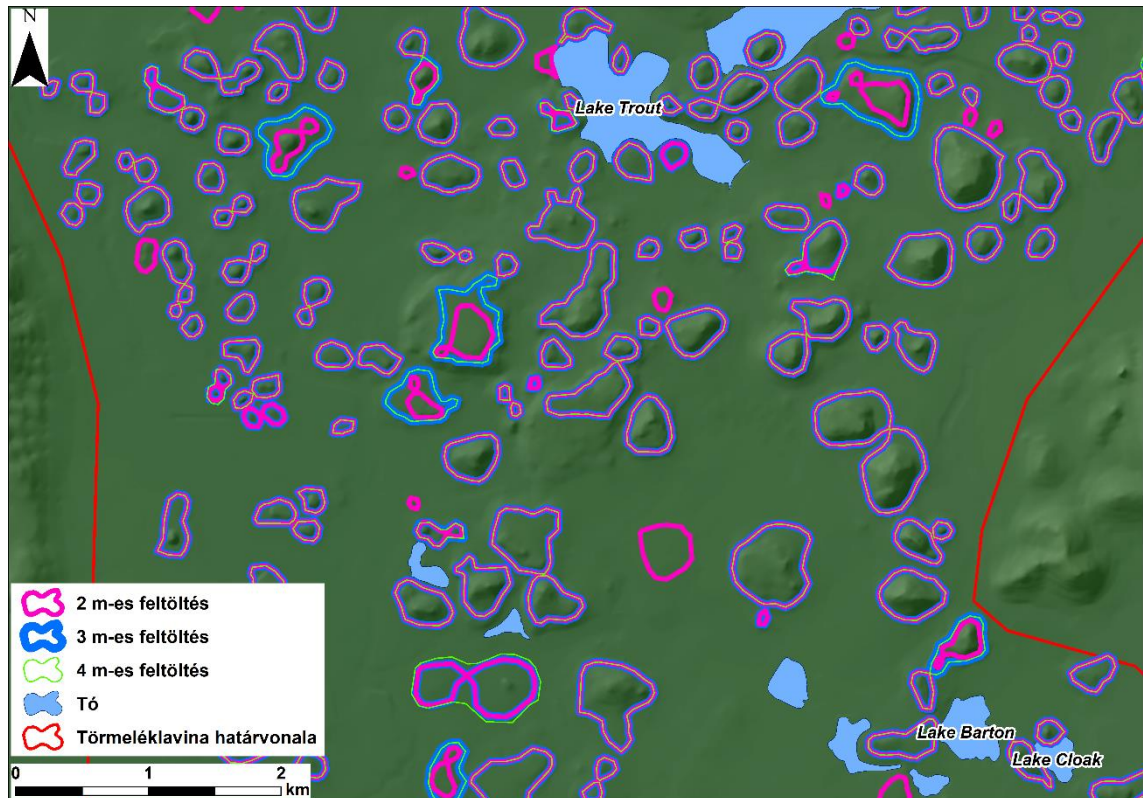
használtam, ehhez pedig az általam megrajzolt területekre, illetve a domborzatmodellekre volt szükségem.

Miután megkaptam kizárólag a törmeléklavinák domborzatmodellét a „Focal Statistics” eszközt használtam első lépésben. Ennek az eszköznek a segítségével tudtam a domborzatmodelleket „kisimítani”. Ez az eszköz kiszámítja az általunk megadott szomszédsági viszony alapján, a cellahely környezetén belüli értékek statisztikáját (átlag, minimum, maximum, szórás, stb.). A vizsgálatom során a kör alapú szomszédsági viszonyt választottam, mivel a dombokhoz ez a forma áll a legközelebb. Ezesetben pedig a sugár értéket kell megadni, ami mind a három terület esetén 3 cellás lett. Ez az érték bizonyult a legmegfelelőbbnek, annak ellenére, hogy a kisebb dombokat összevonja, ellenben így „szebb”, egyértelműbben lehatárolható formákat kaptam.

A 2. lépés során, hogy a továbbiakban ne negatív számokkal kelljen dolgozni az előző lépésben megkapott raszteres állományt kivontam a terület legmagasabb pontjánál nagyobb kerek számból. Ennek következtében a domborzatmodellt „megfordult” és a domborulatokból mélyedések lettek. Ezt a „Raster Calculator” eszköz segítségével értem el. A tényleges magassági értékek eltérőek voltak a különböző területeken a magasságkülönbségből adódóan.

Az automatizált lehatárolás előkészítésének 3. és egyben utolsó lépéseként egyfajta „feltöltést” alkalmaztam, hogy egy bizonyos érték alatt a nagyon kicsi önálló halmokat, ne tekintsük törmeléklaviná dombnak. A „Fill” nevű eszköz volt ebben a segítségemre, ugyanis ez az eszköz feltölti a digitális domborzatmodellben található zárt mélyedéseket. Opcióként beállítható, hogy csak egy bizonyos küszöbértéknél kisebb mélyedéseket, avagy minden mélyedést töltsön fel az eljárás. Mivel célom az volt, hogy csak a „hibának” tekinthető kisebb mélyedéseket töltssem fel, ezért küszöbértéknek egy viszonylag kis számot igyekeztem választani. Mivel a 2. lépésben mondhatni „megfordítottam” a domborzatmodell, ezért ebben az esetben az eredeti domborzat szerinti kis halmokat (amik az inverzben kis mélyedések) tölti fel az eszköz. Mindhárom terület esetén kipróbáltam 2 m-es, 3 m-es, illetve 4 m-es küszöbértékkel. A 7. ábrán a három feltöltés alapján elkészített automatizált dombokat ábrázoltam. Jól láthatjuk, hogy a 4 m-es (zöld színnel) küszöbérték a kisebb dombokat összevonja és vannak olyan dombok, amiket nem

is észlel. Ezzel ellentétben pedig a 2 m-es (rózsaszín színnel) küszöbérték több kisebb dombot is észlel vagy akár olyan dombokat is, amik szemmel láthatóan nem kivehetőek a domborzatmodellből. Ezért a 3 m-es küszöbérték volt a legésszerűbb választás és ez mutatott a legnagyobb hasonlóságot a már manuálisan megrajzolt dombokkal.



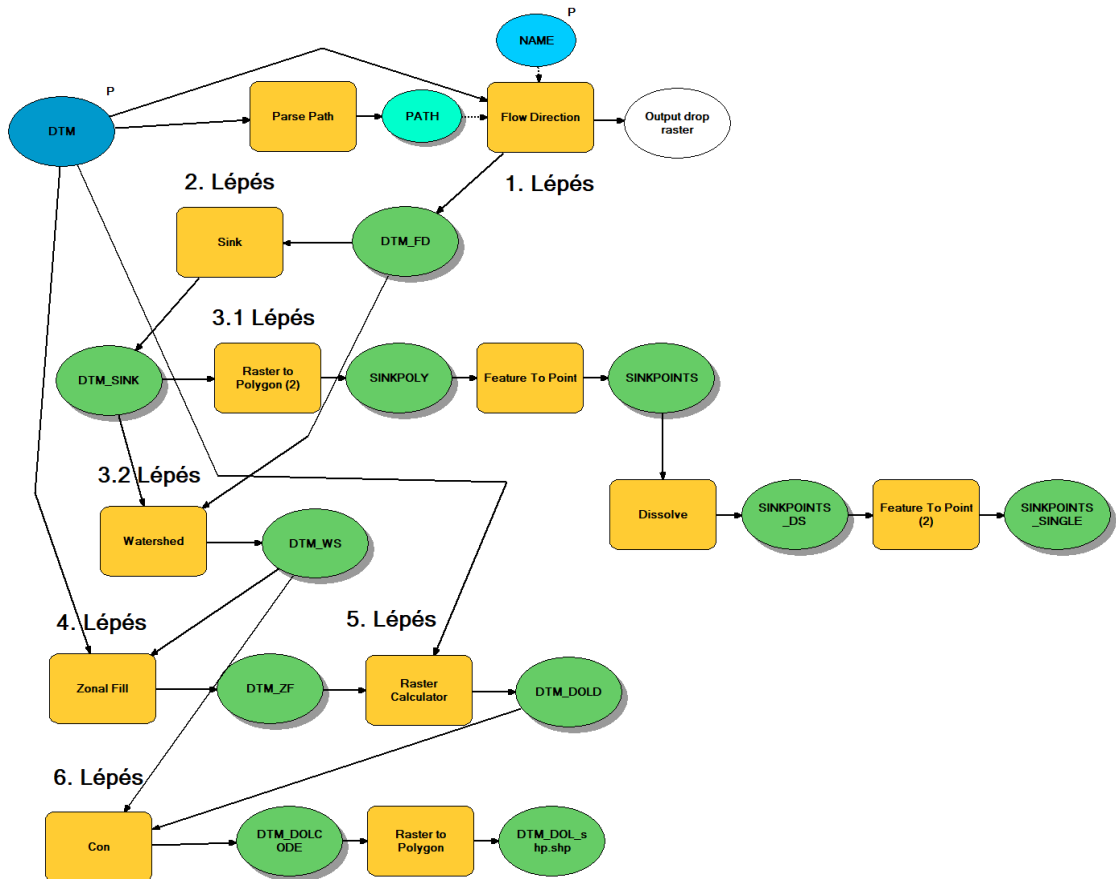
7. ábra: 2 m-es, 3 m-es, illetve 4 m-es küszöbérték megadásával, az automatizált módszerrel elkészített törmeléklavina dombok a Mt. Shasta területén LiDAR alapján

### III.3 Vizsgálati módszerek

A vizsgálatom során a TELBISZ T. (2021) által kidolgozott módszertant alkalmaztam a vulkáni törmeléklavina dombok lehatárolásához. Ez az eljárás lényegében úgy keresi meg a dombokat, mintha karsztos tájon fekvő töbrök lennének, mivel a domborzatmodellt „megfordítja” és ezután lefolyástalan formákat keres a felszínen.

A vizsgálat gyorsabb végrehajthatóságát két „Model Builder”-ben összeállított modell biztosította a számomra, amit a 8. és 9. ábrán láthatunk. Az első modell futtatásakor két paramétert kell megadnunk (8. ábrán a P-vel jelölt buborékok), az előző részben eredményül kapott előfeldolgozott DEM-et, valamint a kimeneti raszternek a

nevét. A „Parse Path” eszközzel minkét modell esetén megadhatjuk, hogy a modell futása közben létrejövő állományok elérése a bekért adatokkal azonos legyen, továbbá hogy a nevük egy részét is megkapják a kimeneti fájlok.



8. ábra: Az automatizált lehatároláshoz használt modell

Miután bekerültek a kért adatok, a modell első lépésben a „Flow Direction” eszközzel dolgozik. Ez az eszköz azt számolja ki, hogy ha a felszínre csapadék érkezik, akkor az milyen irányban fog elfolyni minden egyes cellából valamelyik szomszédos cellába. Ennek eredményeként pedig megkapjuk a lefolyástalan mélyedéseket, amelyek a mi esetünkben a törmeléklavina domboknak felelnek meg.

Ezután 2. lépésként a „Sink” eszköz megkeresi ezeknek a mélyedéseknek a legmélyebb pontját, ami akár több cellából is állhat („víznyelőpontok”). Ezután a modell két ágra szakad. Az egyik ágon (3.1 lépés) a megkapott nyelőpontok raszteres állományát vektoros állománnyá alakítjuk („Raster to Polygon”), majd a poligonokat pont réteggé alakítjuk („Polygon to Point”). Azonban egy mélyedésnek több nyelőpontja is lehet, ezért

ezeket össze kell vonni, amit a „Dissolve” eszköz segítségével és a „GRIDCODE” attribútum alapján tesz meg a modell. Ez az oszlop egy azonosító sorszámot tartalmaz, ami még a „Sink” művelet során jön létre. A másik ágon (3.2 lépés) pedig a „Watershed” eszköz segítségével meghatározzuk a 2. lépésben megkapott víznyelőpontokhoz tartozó vízgyűjtőterületeket.

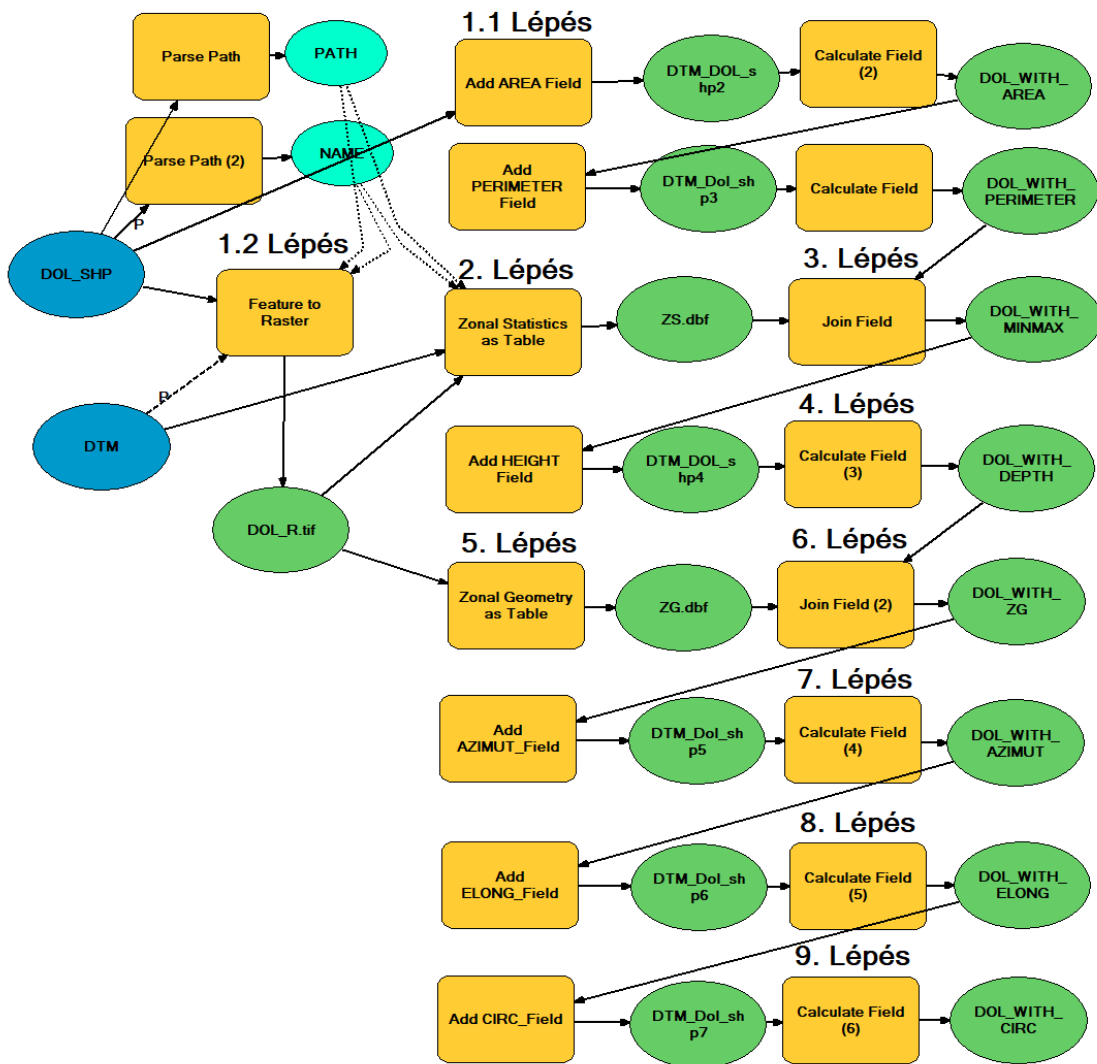
A 4. lépésben a modell a „Zonal Fill” eszköz használatával feltölti a domborzatmodell azon részeit, amik a vízgyűjtő peremének legalacsonyabb pontjánál alacsonyabb fekszenek. Ezt esetünkben, úgy kell értelmezni, hogy a dombok csúcsához szintben legközelebb eső nyereg szintjéig határoljuk le a formákat. A 5. lépésben a „Raster Calculator” eszköz segítségével egy kivonást hajt végre a modell. A 4. lépésben megkapott raszterből kivonjuk a bemeneti paraméterként szolgáló előfeldolgozott rasztert. Ennek következtében pedig megkapjuk a vízgyűjtők peremmagasságához viszonyított szintkülönbségeket. Ami a mi esetünkben a dombtetőkhöz szintben legközelebb eső nyereg magasságához viszonyított értékeket jelenti.

Ezután a modell a 6. lépés során az előző lépésben megkapott raszterünket egy „Con” nevű eszköz megvizsgálja, hogy a cellák értékei nagyobbak-e nullánál. A végeredményben pedig azokat a cellákat kapjuk meg, amikre ez a feltétel érvényesül, tehát a zárt mélyedéseinket, amit utána vektoros állománnyá alakítunk („Raster to Polygon”).

A másik modell (9. ábra) a törmeléklavina dombok fontosabb mérőszámait számolja ki. A modell vektoros és raszteres állományokkal egyaránt számol, ugyanis a területet és kerületet a vektoros poligonokból, míg a többi mérőszámot (megnyúltság, koordináták, relatív magasság, stb) a raszteres állományból tudja kiszámolni. A mérőszámokat pedig a vektoros állomány attribútumtáblájához kapcsolja.

Ez a modell is két paramétert kér be tőlünk (9. ábrán P-vel jelölt buborékok). Az egyik paraméter a kiindulási domborzatmodell, a másik pedig a törmeléklavina dombok vektoros állományai (automatizált és manuális). Az első lépés lényegében két ágra szakad. Az első ágon (1.1 lépés) létrehoz két új oszlopot („Add Field”), amiben a törmeléklavina dombok vektoros állományaiból kiszámolja a dombok területét és

kerületét. A másik ágban (1.2 lépés) pedig az előbb említett állományt raszteres állománnyá alakítja a „Feature to Raster” eszköz segítségével.



9. ábra: A törmeléklavina dombok paramétereinek számolását segítő modell

A 2. lépésben a „Zonal Statistics as Table” eszköznek két bemeneti állományra van szüksége. Az egyik az eredeti domborzatmodell a másik az 1.2 lépésben megkapott dombok raszteres állománya. Továbbá be kell neki állítani egy mezőt, ami tartalmazza az egyes zónákat. Ez esetben a „VALUE” oszlopot használtam. Ez alapján pedig egy táblázatot kapunk, ami minden zóna *tengerszint feletti minimum és maximum magasságát* tartalmazza.

A 3. lépés az előzőekben kiszámolt mérőszámokat hozzacsatolja a vektoros állományhoz a már fentebb említett „GRIDCODE” oszlop alapján. A 4. lépésben a modell először létrehozza az oszlopot, amiben a „Calculate Field” segítségével meghatározza a *relatív magasságot*, amit úgy kapunk meg, hogy a tengerszint feletti maximum magasságból kivonjuk a tengerszint feletti minimum magasságot.

Az 5. lépésben a „Zonal Geometry as Table” eszköznek egy bementi paramétere van szüksége, ami a dombok raszteres állománya, itt szintén meg kell adni a zónákat tartalmazó oszlopot („VALUE”), valamint a kimeneti raszter cellaméretét, ami az esetünkben 10 méter. Eredményül egy táblázatot kapunk, amiben az ellipszis jellemzőit (*x, y koordináták, főtengely félhossz, kistengely félhossz, orientáció*) is megtaláljuk. A 6. lépésben ismét a „Join Field” segítségével hozzacsatoljuk a vektoros állományunk attribútumtáblájához a „GRIDCODE” oszlop alapján.

A 7., 8., és 9. lépésben is az oszlop létrehozása után a „Calculate Field” eszközzel számol a modell. A 7. lépésben kiszámolja az *azimutot*, amit úgy kapunk meg hogy az orientációt 90°-ból kivonjuk. A 8. lépésben a *megnyúltságot* számolja ki a modell, mégpedig úgy, hogy a főtengely félhosszát elosztja a kistengely félhosszával. Az utolsó lépésben pedig a *kerekítettséget* számolja ki, amit a következő képlettel kapunk meg:  $4\pi * \frac{\text{terület}}{\text{kerület}^2}$ .

A modellek lefutása után pedig még ki kellett számolni az automatizáltan és manuálisan lehatárolt dombok távolságát a forrás vulkán középpontjától. Ehhez pedig a „Near” eszközt használtam, amihez meg kellett adni a középpontot vektoros formában, valamint a dombokat szintén vektoros formában.

### **III. 4 Weblap készítése**

Ezenfelül létrehoztam egy weboldalt, hogy az eredményeim könnyebben eljuthassanak a téma iránt érdeklődő emberekhez. A weboldalt HTML (HyperText Markup Language) leíró nyelven írtam, amit a weboldalak készítéséhez fejlesztettek ki. A Microsoft Windows Notepad++, forráskódszerkesztő platformjával tudtam megszerkeszteni. A weboldalamon lényegében egy webtérkép látható, amit a Leaflet segítségével hoztam létre. A Leaflet egy nyílt forráskódú JavaScript-könyvtár, amivel

térképeket tudunk megjeleníteni egy weboldalon (www.leafletjs.com). Ehhez még a „head” tag-en belül be kell hívnom a JavaScript könyvtárát, amit a 10. ábrán láthatunk. Ezután létre kellett hoznom egy szövegblokkban (<div></div>) a térkép helyét, majd a térképvásznat (L.map), ahova be tudjuk hívni a különböző térképeket (L.tileLayer). A 11. ábrán ennek a folyamatnak a kódjait láthatjuk.

```
<link rel="stylesheet" href="leaflet/leaflet.css" />
<script src="leaflet/leaflet.js"></script>
```

10. ábra: A Leaflet JavaScript könyvtárnak a behívása

```
<div id="terkep_helye"></div>
<script>
  /* létrehozunk egy Leaflet térkép objektumot
   a 'terkep_helye' azonosítójú div részben */
  var map=L.map('terkep_helye').setView([13.413452,123.481811], 12.5);

  // különböző térképek változóban megadása
  var otm=L.tileLayer('https://{s}.tile.opentopomap.org/{z}/{x}/{y}.png', {
    maxNativeZoom: 17,
    attribution: '&copy; <a href="https://www.openstreetmap.org/copyright">OpenStreetMap</a> contributors'
  });
  var osm=L.tileLayer('https://{s}.tile.openstreetmap.org/{z}/{x}/{y}.png', {
    attribution: '&copy; <a href="https://www.openstreetmap.org/copyright">OpenStreetMap</a> contributors'
  });
  var esri= L.tileLayer('https://server.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer/tile/{z}/{y}/{x}', {
    attribution: 'Tiles &copy; Esri &mdash; Source: Esri, i-cubed, USDA, USGS, AEX, GeoEye, Getmapping, Aerogrid, IGN,
    IGP, UPR-EGP, and the GIS User Community'
  });
```

11. ábra: A webtérkép megjelenítéséhez szükséges kódok

A weboldalon létrehoztam 4 különböző gombot, aminek segítségével külön-külön is megnézhetők az egyes vulkánok, illetve a negyedik gombbal egyben is megnézhetjük a helyzetüket egy világtérképen. A különböző rétegek bekapcsolásával, megjelennek az általam elkészített törmeléklavina határvonalak és dombok körvonalai. Ahhoz, hogy a térképen ezek az állományokat meg tudjanak jelenni GeoJSON fájlformátumban kellett exportálnom őket. Az 5. gomb pedig egy másik HTML oldalra mutat, ahol egy hosszabb leírást olvashatunk a vizsgált törmeléklavinákról. A 12. ábrán a gombok létrehozásához szükséges kódokat láthatjuk.

```
<input type="button" value="Iriga" onclick="map.fitBounds(bounds.iri)" />
<input type="button" value="Parinacota" onclick="map.fitBounds(bounds.pari)" />
<input type="button" value="Mt. Shasta" onclick="map.fitBounds(bounds.shasta)" />
<input type="button" value="Összes" onclick="map.fitBounds(lehat.getBounds())" />
További információk:
<input type="button" value="Info" onclick="location.href='info.html';" />
```

12. ábra: A gombok létrehozásához használt "input" tag-ek



Továbbá a térkép oldalán létrehoztam egy rétegkezelőt, ahol az alaptérképet változtathatjuk és az állományok rétegeit ki/be lehet kapcsolni. Ezen felül, ha a törmeléklavinákra kattintunk megjelenik egy kis „popup”, amiben rövid leírás látható az adott törmeléklavináról.

#### **IV. Mintaterületek bemutatása**

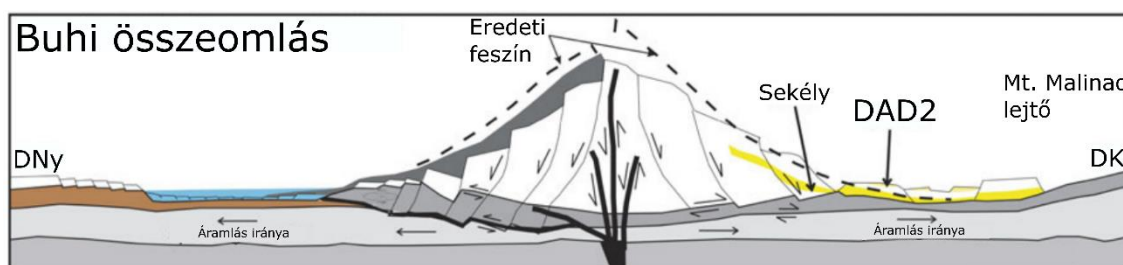
Ebben a fejezetben röviden bemutatom a kiválasztott területeket, azon belül is a törmeléklavinák kialakulásának történetét, mivel a vizsgálat elengedhetetlen része, hogy valamilyen háttértudásunk legyen ezekről a területekről. Próbáltam a Föld különböző részeiről származó vulkánokat választani, ahol a domborzatmodellen is jól megfigyelhetők a törmeléklavina dombok. Ezért a vizsgálatom során az Iriga vulkánt (Fülöp-szigetek), a Parinacotát (Bolívia) és a Mt. Shastát (USA) választottam.

##### ***IV.1 Iriga***

Az Iriga vulkán egy rétegvulkán, ami a Fülöp-szigetek középső szigeteinek egyikén található. A térséget erős vulkanizmus jellemzi (Csendes-óceáni tűzgyűrű tagja), amit a szubdukciós lemezek okoznak (AURELIO, M., 2000). A vulkán legmagasabb pontja 1149 méter tengerszint feletti magasságban található. Nyugati oldalról Iriga városa, keleti oldalról pedig Buhi városa határolja. Jól ismert a délkeleti irányban elnyúlt törmeléklavina által okozott kalderájáról (PAGUICAN, E. M. R. et al., 2012). A lópatkó alakú kaldera 2 km széles és 3 km hosszú (AGUILA L. et al., 1986).

AGUILA L. et al. (1986) tanulmányában a törmeléklavina keletkezését még nem tudták megmagyarázni. Lehetségesnek tartották, hogy több esemény is közrejátszott a kialakulásában. Egy nagyobb földrengés, egy nagyobb felhőszakadás, a kőzetek hidrotermális elváltozása vagy egy magmabenyomulás is okozhatta a lavinát. Azonban PAGUICAN, E. M. R. et al (2012) tanulmányából mégis kiderült, hogy a törmeléklavina üledéke nem utal semmilyen magmás tevékenységre, tehát az összeomlásnak nincs közvetlen vulkáni eredetű oka. A kialakulást ugyanis a vulkán alatt kialakult, jelentős erősségű oldalirányú nyíró feszültség okozta. Ennek ellenére a szakirodalom vulkáni törmeléklavinaként kezeli, és ezért tartalmazza az én vizsgálatom is ezt a területet.

A területen két törmeléklavina üledék is megtalálható, amit a szakirodalom DAD1-nek (nyugati) és DAD2-nek (keleti; *Debris Avalanche Deposit*) nevezett el (PAGUICAN, E. M. R. et al., 2012). Azonban én csak a keleti törmeléklavinát vizsgáltam (13. ábra), ugyanis a domborzatmodellen ez a rész jól kivehető. Az üledékek elterjedése „gomba alakú”, ami arra utal, hogy mozgása során oldalirányban szétterjedt az anyag. Az üledék 70 km<sup>2</sup> területet fedett le és 1,5 km<sup>3</sup> anyag zúdult le a vulkánról (AGUILA L. et al., 1986, PAGUICAN, E. M. R. et al., 2012).

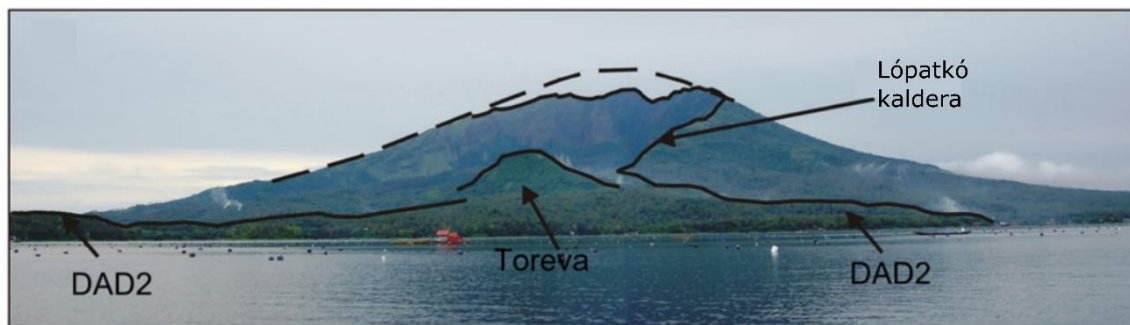


13. ábra: A Bui összeomlás keletkezésének sematikus ábrája, Iriga vulkán (Fülöp-szigetek; PAGUICAN, E. M. R. et al., 2012)

A 13. ábrán a Bui összeomlás során keletkezett DAD2 üledék kialakulásának sematikus ábrája látható. A kialakulásának éve nem tisztázott van, aki szerint (AGUILA L. et al., 1986) 1628-ban keletkezett, van, aki pedig az 500-as évekre teszi a keletkezést (Belousova, M., Listanco, E. 2011). A csuszamlási szerkezetek sekélyebben alakultak ki, mint a nyugati oldalon. A sasbérce és árkos felszín, a mozgás során kialakuló alapi nyírásnak köszönhető (a 13. ábrán nyilakkal jelölve). Jól látható az is az ábrán, hogy a keleti oldalon elhelyezkedő Mt. Malinao vulkán lába miatt a törmeléklavina vége magasabban helyezkedik el, mint a középső régió (PAGUICAN, E. M. R. et al., 2012). A történelmi feljegyzések arra utalnak, hogy a Bui-tó (a vulkántól keletre) a lavina lezúdulása előtt nem létezett, ebből pedig arra következtetnek, hogy a törmeléklavinának olyan vastagnak kell lennie, amilyen mély a tó (AGUILA L. et al., 1986). A tavat egyébként a törmeléklavina alakította ki, ugyanis felduzzasztotta az akkori Barit folyót (PAGUICAN, E. M. R. et al., 2012).

A törmeléklavinára jellemző, hogy a dombok magassága és területe csökken a vulkántól való távolsággal. A törmeléklavina dombok az áramlási iránnyal párhuzamosan nyúltak meg, valamint a hossz tengelyük is így rendeződött be. A lavina középső részén

található a legtöbb domb, továbbá a legmagasabb dombok is itt helyezkednek el. A kaldera közelében megmaradt dácitos láva tömbök lényegében *toreva blokkok*, amit a 14. ábrán is láthatunk. A törmeléklavina blokkokban pedig több egymáshoz illeszkedő (*jigsaw*) *repedést* is felfedeztek (AGUILA L. et al., 1986, PAGUICAN, E. M. R. et al., 2012).



14. ábra: Az Iriga vulkán (Fülöp-szigetek) lópatkó alakú kalderája és az előtt elhelyezkedő *toreva* blokk. DAD2 a törmeléklavina üledékét jelzi. (PAGUICAN, E. M. R. et al., 2012)

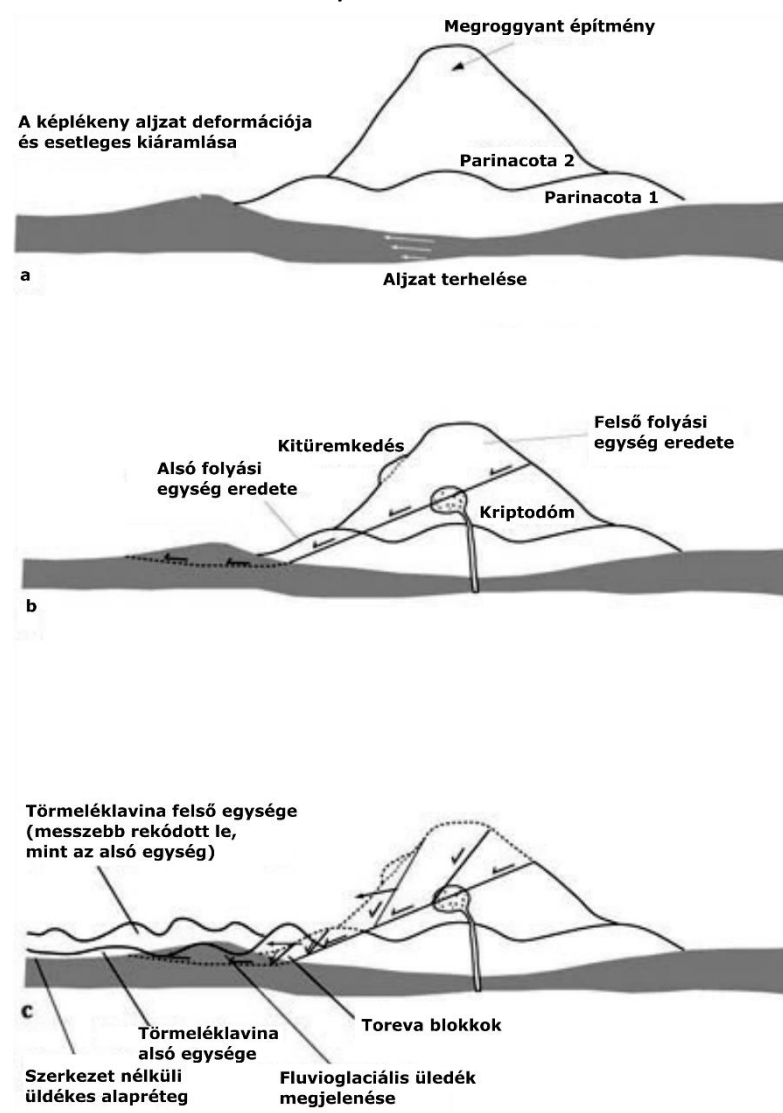
#### **IV.2 Parinacota**

A Parinacota (Bolívia) vulkán a Nevados de Payachata vulkáni komplexumhoz tartozik, ami az Andok-hegységben található, Bolívia és Chile határánál. Az előző vulkánhoz hasonlóan ez is rétegvulkán és a vulkanizmusát szubdukciós lemezek okozzák (HORA, J. et al., 2007). A Lauca folyó medencéjének felső szakaszán helyezkedik el, ebből adódóan a sok folyóvízi üledék a környezetében. A törmeléklavina kialakulását is ehhez kötik, ugyanis úgy vélik, hogy az üledékes, képlékeny aljzatra egy sűrűbb vulkáni építmény épült, aminek a terhelését már nem bírta el az aljzat, ezért a vulkán összeomlott, majd kialakult a törmeléklavina. A 15. ábrán ezt a folyamatot láthatjuk. A vulkán érdekessége, hogy a törmeléklavinákra jellemző patkó alakú kaldera nem található a domborzaton, ugyanis a helyére már kinőtt egy fiatalabb, szimmetrikus rétegvulkáni kúp (CLAVERO, J. et al., 2002, CLAVERO, J. et al., 2004).

A törmeléklavinát először FRANCIS, P. W., WELLS, G. L. (1988) fedezte fel Landsat felvételek alapján. Ekkor a lavina korát 13 500 B.P.- re tették, amit a Cotacotani-tó üledékéből állapítottak meg, mivel úgy vélték, hogy az egy időben keletkezett a törmeléklavinával. Azonban CLAVERO, J. et al., (2002) vizsgálatából kiderült, hogy a törmeléklavina körülbelül 8000 évvel ezelőtt keletkezhetett, amikor a tó már létezett. A

törmeléklavina 140-150 km<sup>2</sup> területet fedett be és 20-22 km távolságot tett meg. A térfogata körülbelül 6 km<sup>3</sup> lehet, ez az érték háromszor nagyobb, mint a Mt. St. Helens törmeléklavina térfogata. Azonban ezeket a paramétereket nehéz megállapítani a korából adódóan, ugyanis a mai felszín nagyban eltér az akkori felszíntől (CLAVERO, J. et al., 2002, HORA, J. et al., 2007, JICHA, B. R. et al., 2015).

A törmeléklavinák egyik fontos jellemzője a kifutási aránya, azaz a *Heim arány*, amit a következőképp kapunk meg:  $\frac{A}{V^{\frac{1}{3}}}$ . Ahol az A a területet jelenti, a V pedig a



15. ábra: A Parinacota törmeléklavinájának kialakulása és lerakódása sematikusán (CLAVERO, J. et al., 2004)

térfogatot. Ez az érték a Parinacota esetén 0,08 volt, ami beleesik a száraz törmeléklavinák intervallumába (CLAVERO, J. et al., 2002).

A törmeléklavina üledékéről elmondható, hogy ék alakja van, ugyanis a vulkán kúpjánál még szélesen terül el és fokozatosan szűkül a vulkántól való távolsággal. A lavina terjedését két tényező is korlátozta, egyrészt a Lauca folyó medencéje, másrészt pedig a nyugaton fekvő GuaneGuane – hegy. A terület érdekessége, hogy a törmeléklavina üledékéből hiányzik a finom szemcsés mátrix fácies. Az üledék két összetételében és morfológiájában eltérő egységeket mutat. Az *alsó egység* (15. ábra) további két alegységre osztható. A egyik a vulkánhoz közel eső részeken található, riodácitos lávák anyagából keletkezett *toreva blokkokból* áll. A másik alegység főként riodácitos *breccsákból* és fluvioglaciális üledékekből áll. A törmeléklavina északi és déli részére jellemző, azonban a felszínen nem található meg ez az egység. A *felső egység* (15. ábra) nagy lávatömbökből és breccsákból áll. A törmeléklavina középső részén jellemző és gyakori, hogy a dombokat tavak veszik körül (CLAVERO, J. et al., 2002). Ezek az úgynevezett *holtjég-lyukakban keletkeztek* (*kettle hole*, 16. ábra), amik a lavina által közrefogott és eltemetett nagy jégtömegek elolvadásával alakultak ki (JICHA, B. R. et al., 2015). A 15. ábrán is jól látható, hogy a felső egység messzebb rakódott le a vulkántól, mint az alsó egység.

Összeségében elmondható a Parinacota (Bolívia) törmeléklavina üledékéről, hogy nagyon változatos kőzetek fordulnak elő benne, ugyanis találhatóak bennük tavi, folyó vízi,



16. ábra: A Parinacota törmeléklavinájának területén kialakult holtjég-tavak  
([www.mergili.at/worldimages/picture.php?/8528](http://www.mergili.at/worldimages/picture.php?/8528))

glaciális és vulkáni üledékek is. A törmeléklavina dombok a vulkánhoz közel eső területeken merőlegesek az áramlási irányra, azonban az üledék szélein inkább párhuzamosak. Továbbá térfogatuk fordítottan arányos a vulkántól való távolsággal. A lavina legalsó szerkezet nélküli kavicsos, homokos rétege, pedig a lavina mozgása során keletkező alapi nyírás eredménye (CLAVERO, J. et al., 2002).

#### ***IV.3 Mt. Shasta***

A Mt. Shasta (USA) törmeléklavinájáról kezdetben a tudósok csak találgatni tudtak, hogy milyen felszínformák és miként alakultak ki. Akkoriban CAMPBELL, M. R. (1915) úgy gondolta, hogy mivel a dombok vulkáni anyagból állnak, ezért vulkáni építményeknek kell lenniük. FENNER, C. N. (1923) is hasonlóan gondolkodott, a dombok létrejöttét magmatestek benyomulásával képzelte el. WILLIAMS, H. (1932) tanulmányában pedig morénaként hivatkozik rájuk, amit a Tioga-kori gleccser hagyott hátra. CHRISTIANSEN, R. L. (1982) utalt először arra, hogy a dombos felszint a Mt. Shasta oldaláról lezúduló törmeléklavina okozta. Ezt később a terepi munkák alátámasztották (CRANDELL, D. et al., 1984).



17. ábra: *A Mt. Shasta törmeléklavinájának dombos felszíne (Képet készítette: Harry Glicken, 1982)*

A Mt. Shasta (USA) törmeléklavinája a vulkántól északnyugatra terül el mintegy 675 km<sup>2</sup>-es felszínen. A lavina mozgása során 43 km-t tett meg és 26 km<sup>3</sup> anyagot szállított magával. Ennek köszönhetően lett a legnagyobb ismert negyedidőszaki törmeléklavina. Az üledék a Shasta-völgyben rakódott le, több száz halom, domb, és gerinc található ebben a térségben, amit sík területek választanak el egymástól (17. ábra; CRANDELL, D. et al., 1984).

A törmeléklavina pontos kialakulásának menetét eddig még nem sikerült a tudósoknak megállapítaniuk. A lavina üledékein belül nem találtak fiatal robbanásból származó anyagokat és nincs semmi bizonyíték arra, hogy a törmeléklavina valamilyen közvetlen vulkáni tevékenység során jött volna létre. Azonban a paramétereit (megtett távolság, terület, térfogat) elnézve, arra következtetnek, hogy valamilyen benyomulások (magma) vagy robbanásos tevékenység okozhatta a lavinát, de akár egy földrengés eredménye is lehetett (CRANDELL, D. et al., 1984, CRANDELL, D. 1989).

A törmeléklavina nagy mobilitását, annak köszönheti, hogy a lavina keletkezésekor kialakult egy telített, finom szemcsés mátrix a lavina alatt, amin gyorsan le tudott „csúszni” a lejtőn. A Parinacotához hasonlóan, a patkó alakú kaldera nem látható a vulkánon, ez a lavina keletkezésekor feltehetően kialakult, azonban az idő elteltével az újabb kitörések termékei és vulkáni építményei (Shastina) betemették azt (CRANDELL, D. et al., 1984, CRANDELL, D. 1989).

A törmeléklavináknak megfelelően itt is egy törmeléklavina blokk és egy törmeléklavina mátrix fáciesből áll az üledék. A mátrix fácies nagyrészt piroxén-andezites kőzetekből áll. Azonban homokos, kavicsos rétegek is megjelennek, illetve homokkő, konglomerátum vagy metamorf kőzetek is. A lerakódott üledék szerkezetileg nagy hasonlóságot mutat a sárfolyásokkal (CRANDELL, D. et al., 1984).

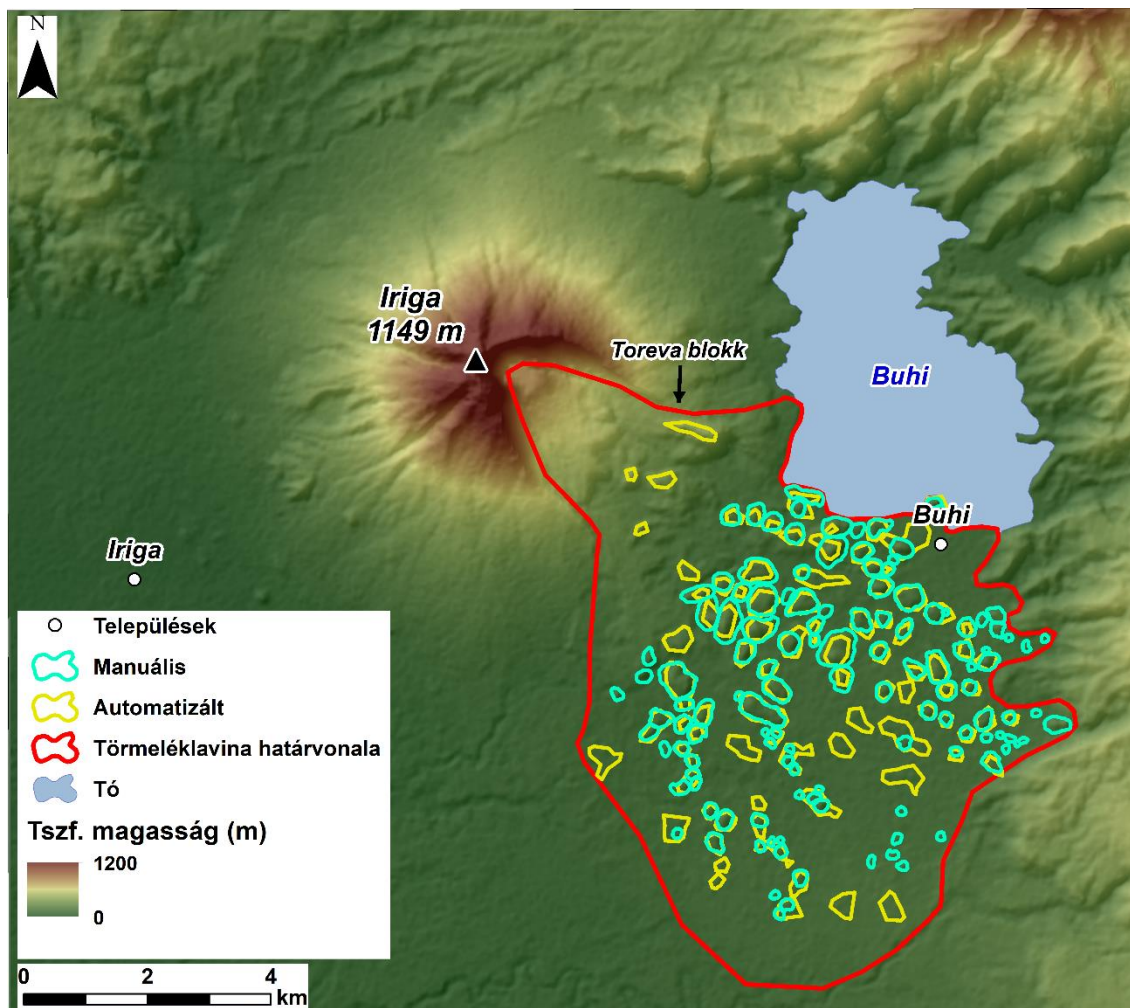
A törmeléklavina blokkok anyaga nagyrészt a forrásvulkán andezitjéből származik, előfordul breccsa formában is. A terepi munkák során kiderült, hogy egyes dombok kőzettani szempontból kifejezetten homogének. Más dombok esetében, ahol többféle kőzet megtalálható, ott a forrásvulkán kőzeteiben is megfigyelhető rétegzettség jelenik meg. Ez arra utal, hogy kezdetben egymáshoz szorosan kapcsolódó kőzettömbök indultak meg lefelé a lejtőn, majd a vulkántól távolodva széttöredeztek, de még így is

megmaradtak egybefüggő darabok, melyek megőrizték az eredeti vulkán rétegeit a dombokban is (CRANDELL, D. 1989). UI, T., GLICKEN, H. (1986) kutatása során kiderült, hogy a törmeléklavina blokkokon belül található repedések nem a szállítás következtében keletkeztek, hanem még korábban a vulkánon vagy annak közelében.

## V. Eredmények

### V.1 Iriga

A vizsgált területeim közül az Iriga vulkánál kialakult törmeléklavina volt a legkisebb minden paraméterét tekintve, valamint a legalacsonyabb tengerszintfeletti magasságban is helyezkedik el. A vizsgálatom során a PAGUICAN, E. M. R. et al., (2012)



18. ábra: A manuális és automatizált módszerrel lehatárolt törmeléklavina dombok, Iriga vulkán (Fülöp-szigetek)



által meghatározott törmeléklavina határvonallal dolgoztam, aminek nyugati oldalát azonban kissé beljebb kellett húznom, mivel azokon a részeken hiányoztak a törmeléklavinára jellemző dombok. Mint azt már említettem a törmeléklavina Iriga és Buhi városok között zúdult le és északról a Buhi tó határolja, ami a törmeléklavina keletkezésekor alakult ki (18. ábra).

A térképen (18. ábra) a manuális és automatizált módszerrel lehatárolt törmeléklavina dombokat egyaránt ábrázoltam. A lavina kiterjedése a vulkán közelében még keskeny, azonban kiszélesedik, ahogy eléri a sík területeket (gomba alak). Jól látható, hogy a lavina középső régiójában tömörülnek a dombok, valamint a vulkántól távolodva csökken a területük. Továbbá megfigyelhető, hogy a törmeléklavina terjeszkedését lényegében csak az Irigától keletre fekvő vulkán (Mt. Malinao) korlátozta. A törmeléklavina a vulkán délkeleti oldaláról zúdult le, maga után hagyva a jellegzetes patkó alakú kalderát, ami szintén jól látható a térképen. A vulkán közelében megmaradt *toreva blokk* is jól kivehető a domborzaton. Látható, hogy az automatizált módszer esetén lehatárolt dombok olyan területeken is megjelennek, ahol nem igazán szembetűnőek, valamint elmondható, hogy területük nagyobb, mint a manuális módszerrel lehatárolt domboké. A vulkán közelében nehéz volt lehatárolni a formákat, mivel ott lejtőre települtek, ezért ott a manuális módszerrel nem is határoztam meg dombokat. A törmeléklavina dombok hossz tengelyének irányultságáról pusztán a térkép alapján, további vizsgálat nélkül nehéz szabályszerűséget megállapítani.

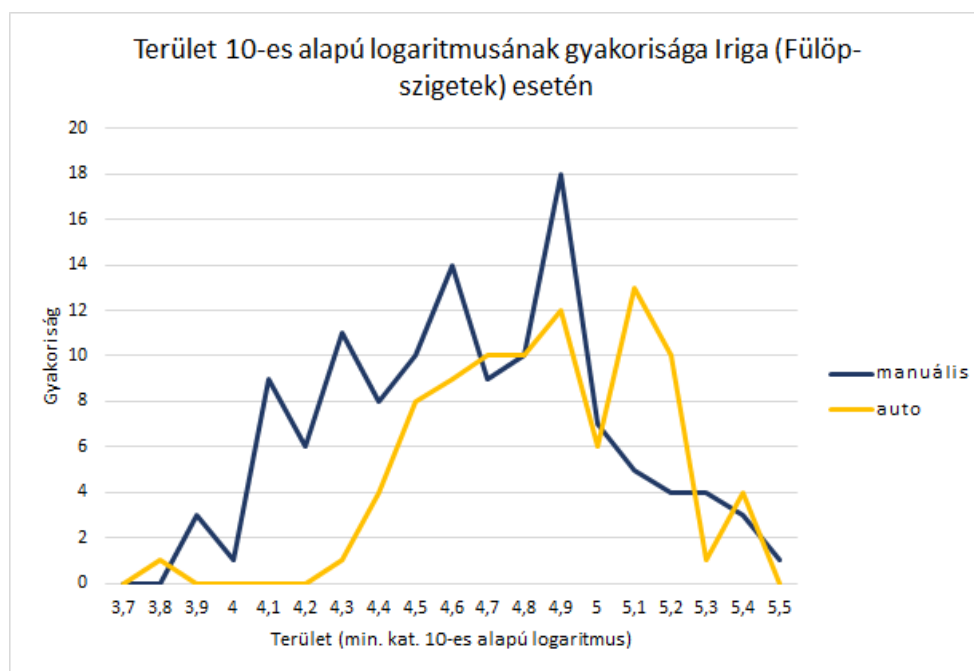
A 2. táblázatban az Iriga vulkán törmeléklavina dombjainak főbb paramétereit láthatjuk, manuális és automatizált módszer alapján egyaránt. Elmondható, hogy az átlagértékeket tekintve minden mérőszám nagyobb értéket mutat a manuális lehatárolás esetén, kivéve a területet és kerületet. Ez utóbbi annak köszönhető, hogy a manuális

Dombok száma	Átlagos rel. magasság (m)	Átlagos terület (m <sup>2</sup> )	Átlagos kerület (m)	Legmagasabb domb (m)	Legnagyobb területű domb (m <sup>2</sup> )	
<b>Manuális</b>	123	29	57349	833	94	281076
<b>Automatizált</b>	89	27	79475	1114	65	245537

2. táblázat: A manuális és automatizált lehatárolás során keletkezett dombok főbb paramétereit, Iriga vulkán (Fülöp-szigetek)

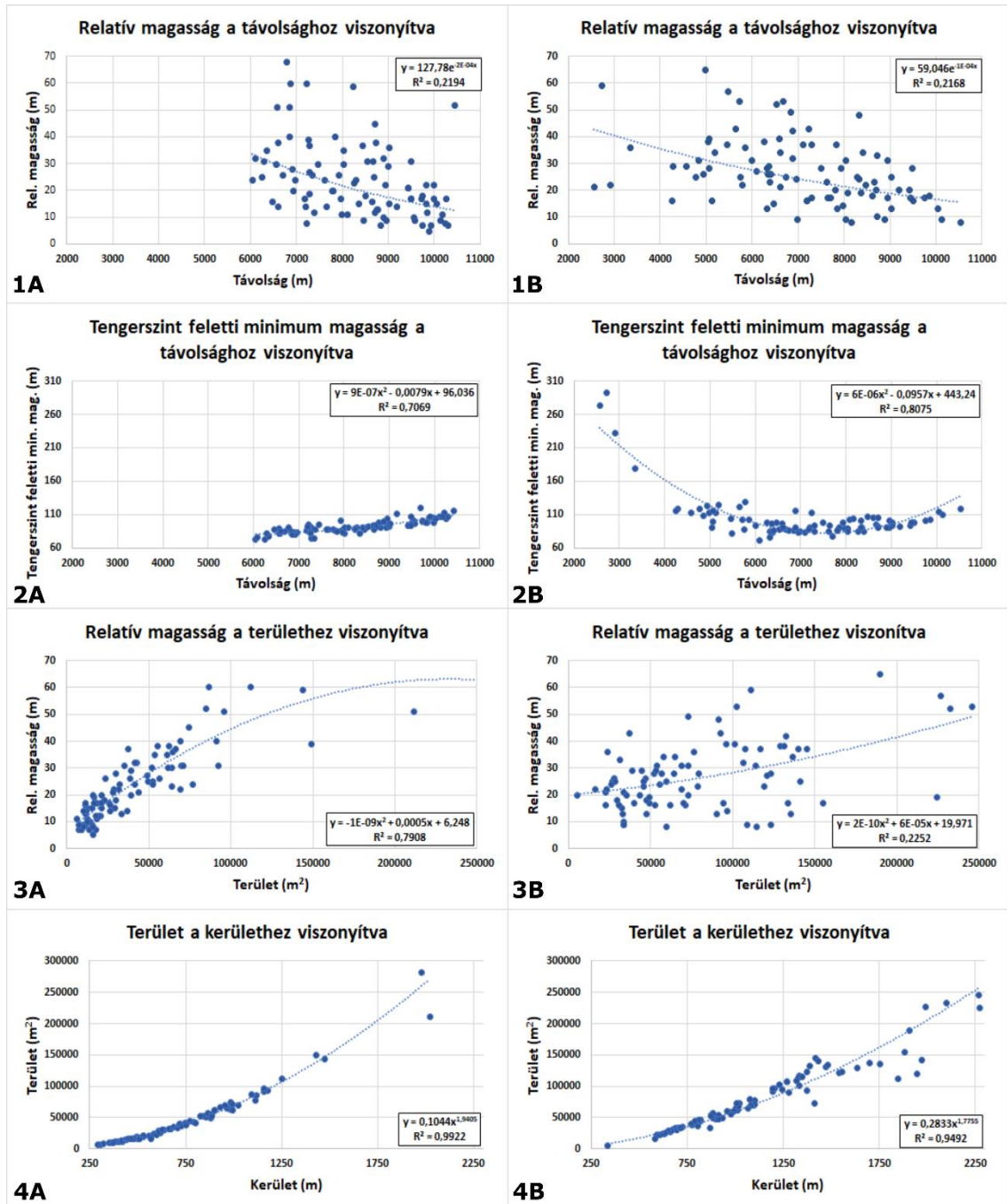
módszerrel „szebb” lehatárolás érhető el, vagyis a dombok körvonala kerekítettebb, kerülete pedig kisebb lesz, mint az automatizált esetben. A területi különbségek már a térképen is láthatók voltak, és a statisztika is azt jelzi, hogy az automatizált módszerrel átlagosan nagyobb dombokat kaptunk. Ennek ellenére a legnagyobb területű domb, mégis a manuális lehatárolás során jött létre. A darabszámokat illetően érdemes megjegyezni, hogy a manuális módszerrel több kisebb dombot is sikerült lehatárolni, amit az automatizált módszer már figyelmen kívül hagyott az adott paraméter-beállítások mellett.

A 19. ábrán a dombok területének a gyakorisági eloszlását láthatjuk. Azért választottam a 10-es alapú logaritmikus ábrázolást, mert a különbségek így jobban kivehetők, és mert ezzel a transzformációval az eloszlás durván a normál eloszláshoz közelít, de azért statisztikailag nem tekinthető pontosan normál eloszlásúnak. Ez a diagram is alátámasztja azt az állítást, hogy a manuális módszerrel több kisebb területű dombot sikerült megtalálni, mint az automatizált módszerrel. Ellenben az automatizált módszer eredményeként több nagyobb területű domb lett lehatárolva, kisebbek pedig alig.



19. ábra: A manuálisan és automatizáltan lehatárolt dombok területe 10-es alapú logaritmusának gyakorisági eloszlása az Iriga (Fülöp-szigetek) esetén

A 20. ábrán a törmeléklavina dombok különböző paramétereinek egymáshoz viszonyított kapcsolatát láthatjuk. Elsőnek a relatív magasság és a vulkántól való távolság viszonyát vizsgáltam (1A, 1B). A korreláció gyengének tekinthető, mégis elmondható,



20. ábra: A manuális és automatizált lehatárolás során készült dombok mérőszámainak kapcsolata. A: manuálisan lehatárolt dombok, B: automatizáltan lehatárolt dombok

hogy a távolság növekedésével a dombok relatív magassága csökken. A kapcsolat gyengeségét jelző  $R^2$ -értéke a két módszer esetén közel azonos.

A második sorban a tengerszint feletti minimum magasság és a távolság diagramjai láthatók. Ezesetben a kapcsolat viszonylag szorosnak tekinthető. Az automatizált módszer esetén (2B) nagyon jól kivehető, hogy a vulkánhoz közel magasabban helyezkednek el a dombok, középen alacsonyan és a törmeléklavina vége a már említett Mt. Malinao vulkán lábára feltorlódott és ezért magasabban fekszik, mint a középső rész. A manuális lehatárolásnál (2A) is észrevehető, hogy a törmeléklavina disztális részén növekedik a tengerszint feletti minimum magasság.

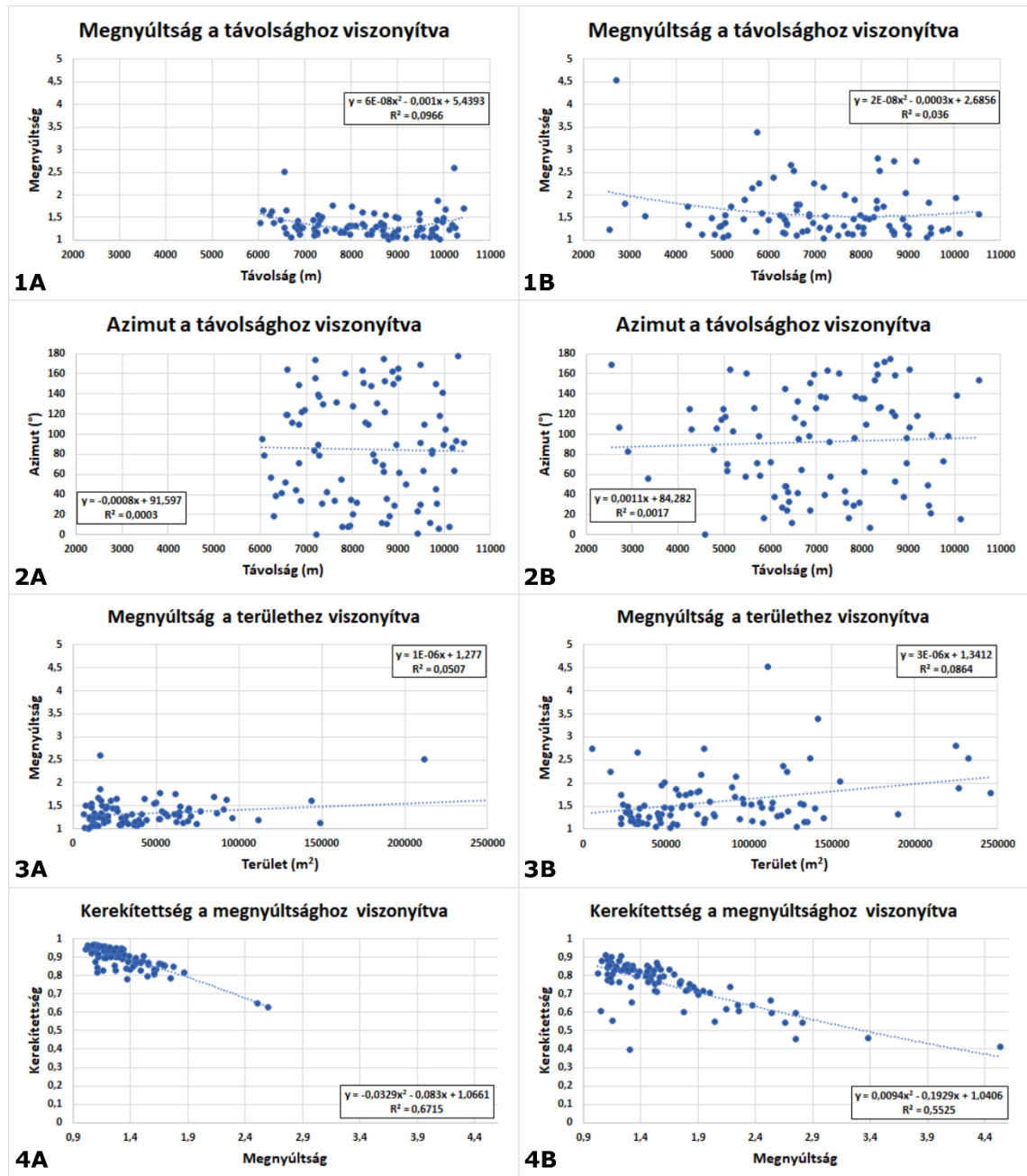
A harmadik sorban a relatív magasság és a terület viszonyát vizsgáltam. A manuális módszer esetén (3A) erősnek tekinthető a korreláció, ellenben az automatizált módszernél nem. A manuális lehatárolással készült dombokról elmondható, hogy a terület növekedésével, nő a relatív magasságuk is. Ez részben az automatizált módszerrel lehatárolt dombokról (3B) is elmondható, azonban jóval nagyobb a szórás. A térképen is látható volt, hogy vannak szélesen elterülő dombok, viszonylag sík terepen.

A negyedik sorban a terület és kerület viszonyát láthatjuk (4A, 4B). E két paraméter kapcsolata a legerősebb, ami logikus, hiszen ha valaminek nő a kerülete növekednie kell a területének is. Az automatizált módszerrel elkészített dombok esetén minimálisan kisebb a kapcsolat, ami az egyes dombok tagoltabb körvonalrajzával függ össze.

A 21. ábrán is a törmeléklavina dombok paramétereinek viszonyai láthatók, itt a hangsúly, azonban a dombok alakján és irányán van. Az első sorban a megnyúltság és a távolság viszonyát láthatjuk (1A, 1B). A két mérőszám között mérhető kapcsolat nincs, mivel az  $R^2$  értéke nem éri el a 0,2-t.

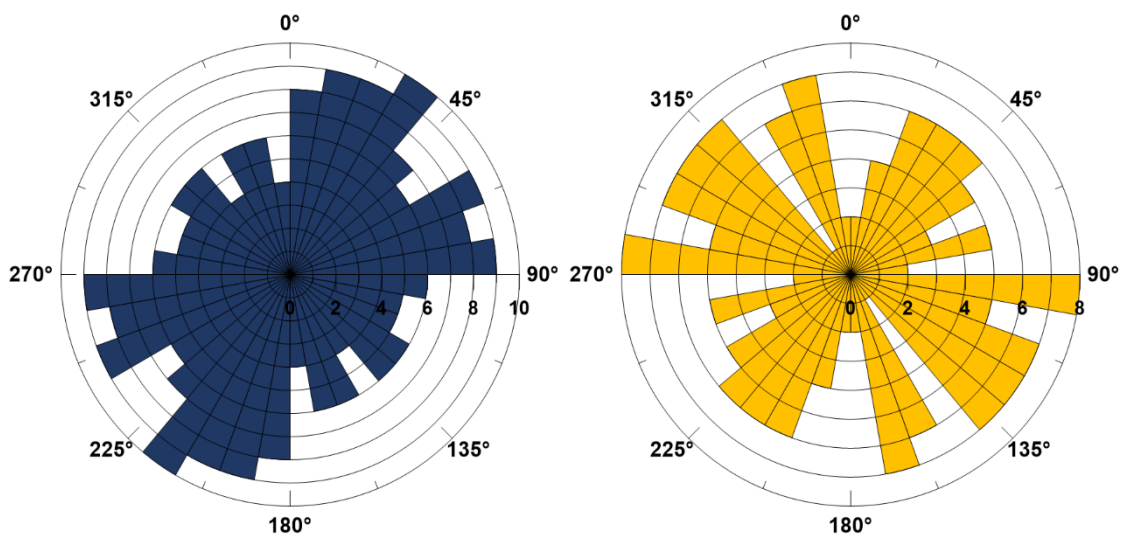
A második sorban az azimut és a távolság kapcsolatát (2A, 2B) a harmadikban a megnyúltság és a terület kapcsolatát (3A, 3B) láthatjuk. Az előzőhöz hasonlóan itt sem látható semmilyen kapcsolat a mérőszámok között. A negyedik sorban pedig a kerekítettség és a megnyúltság viszonyát láthatjuk. A kapcsolat erőssége közepesnek tekinthető. Hiszen ha egy domb körvonala tagoltabb, akkor romlik a kerekítettség. Továbbá ha a megnyújtjuk, akkor is romlik a kerekítettség. Tehát úgy tekinthetjük, hogy

a kerekítettség a tagolt körvonal és a megnyúltság kombinált kifejezője. Ellenben a kapcsolat erőssége itt arra utal, hogy a körvonal tagoltsága kevésbé fontos tényező. A mérőszámok fordítottan arányosak, tehát minél nagyobb egy domb kerekítettsége, annál kisebb lesz a megnyúltsága.



21. ábra: A manuális és automatizált lehatárolás során készült dombok mérőszámainak kapcsolata. A: manuálisan lehatárolt dombok, B: automatizáltan lehatárolt dombok

A 22. ábrán a törmeléklavina dombok hossz tengelyének irányultsága látható rózsadiagramon szemléltetve. A manuális módszerrel lehatárolt dombok (kék színnel) az északkelet-délnyugat tengely mentén a leggyakoribbak. Ezzel szemben az automatizált módszerrel lehatárolt dombok (sárga színnel) esetén két főbb irány is meghatározható. Az ellentétes északnyugat-délkelet tengely mentén a gyakoribb, ami a törmeléklavina irányával párhuzamosnak tekinthető. E mellett északkelet-délnyugat tengellyel megegyező dombok is előfordulnak, amit valószínű csak a dombok szabálytalansága okoz.



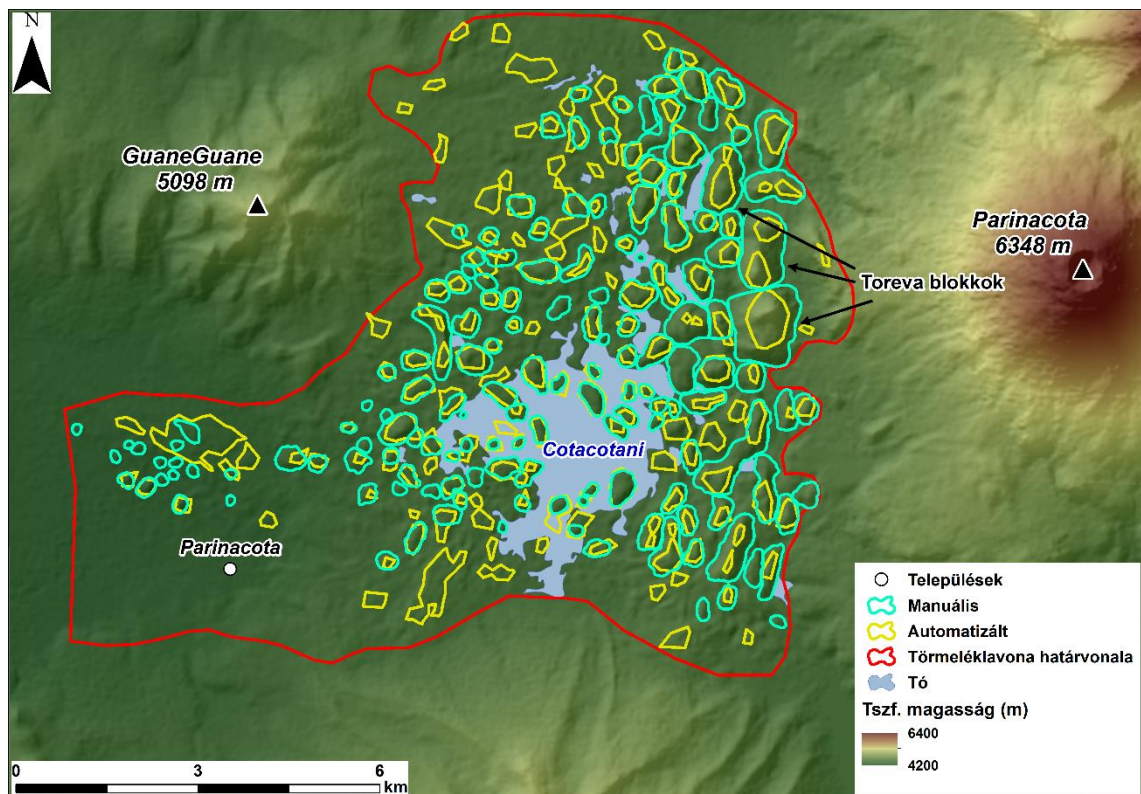
22. ábra: A manuálisan (bal) és automatizáltan (jobb) lehatárolt dombok hossz tengelyének irányultsága. 0° északnak felel meg

## V.2 Parinacota

A Parinacota a vizsgált területeim közül a legmagasabb tengerszint feletti magasságban helyezkedik el. A JICHA, B. R. et al. (2015) által kidolgozott törmeléklavina határvonallal dolgoztam vizsgálatom során, noha a lavina jóval messzebb futott ki, mint ameddig én vizsgáltam. Azonban a legnyugatibb disztális részen nem voltak a domborzatmodellen észlelhető pozitív felszínformák. A 23. ábrán jól látható, hogy a törmeléklavina a vulkán nyugati oldalán zúdult le, azonban a patkó alakú kaldera már nem látható, mivel egy szimmetrikus kúp növekedett a helyére. A lavina kiterjedése a vulkán közeli régiójában széles, és onnan távolodva egyre jobban beszűkül (ék alak), épp ellenkezőleg mint az Iriga vulkán esetén. A lavina terjedését nagymértékben a szemben

lévő (nyugatra fekvő) GuaneGuane hegy korlátozta. Továbbá szembeűnő, ahogyan a törmelékklavina dombokat körülölelik a *holtjég lyukakban* kialakult kisebb tavak.

A térképen a manuális és automatizált módszerrel lehatárolt dombokat egyaránt ábrázoltam. Hasonlóan az Irigához, itt is megfigyelhető, hogy az automatizált módszer során észlelt egyes dombok közel sík területen helyezkednek el, viszonylag nagy kiterjedésben. Ezen a területen is megfigyelhető, hogy a manuális módszer során több kicsi területű dombot sikerült lehatárolni, és összeségében „szebb” dombok keletkeztek, mint az automatizált módszer során. Elmondható, hogy az automatizált módszer az adott paraméterekkel a kisebb dombokat nem észleli vagy összevontan jelennek meg, a manuális módszer során lehatárolt nagyobb dombokat pedig számos esetben több kisebb dombként érzékeli. A szakirodalom említi, hogy az üledékből hiányzik a mátrix fácies, amit a térképről nem láthatunk, azonban az látszik, hogy a nagy blokkok szorosan egymás mellett helyezkednek el. A domborzatból jól érzékelhetően kitüremkednek a vulkánhoz



23. ábra: A manuális és automatizált módszerrel lehatárolt törmelékklavina dombok, Parinacota (Bolívia)

közel eső részeken a *toreva blokkok*. Továbbá jól látható, hogy a dombok sűrűsége és mérete a vulkántól távolodva csökken. A törmeléklavina dombok hossz tengelyének irányultsága szembe tünő a térképen is. Főként a vulkánhoz közel települt blokkokról mondható ez el, hiszen az áramlási irányra merőlegesen rakódtak le, ami az észak-dél tengelynek felel meg.

Az alábbi táblázatban a Parinacota törmeléklavinájának főbb paramétereit láthatjuk. A manuális módszer által lehatárolt minden paraméterében dombok nagyobb értéket mutatnak, kivéve a darabszámban. Ez annak köszönhető, hogy az automatizált módszer a nagyobb dombokat több kicsinek vette, valamint olyan területeken is érzékelt dombokat, ahol a manuális módszer nem. A területértékek viszonylag nagy különbsége is ennek köszönhető. Érdekes, hogy az Iriga esetén a kerületi és területi értékek az automatizált módszer során nagyobbak lettek. A Parinacota törmeléklavina dombjaira azonban ez nem mondható el. Ennek az lehet a magyarázata, hogy ezen a területen már nagyobb relatív magasságú és területileg is kiterjedtebb dombokat kellett lehatárolni, amit az automatizált módszer ily módon kezel.

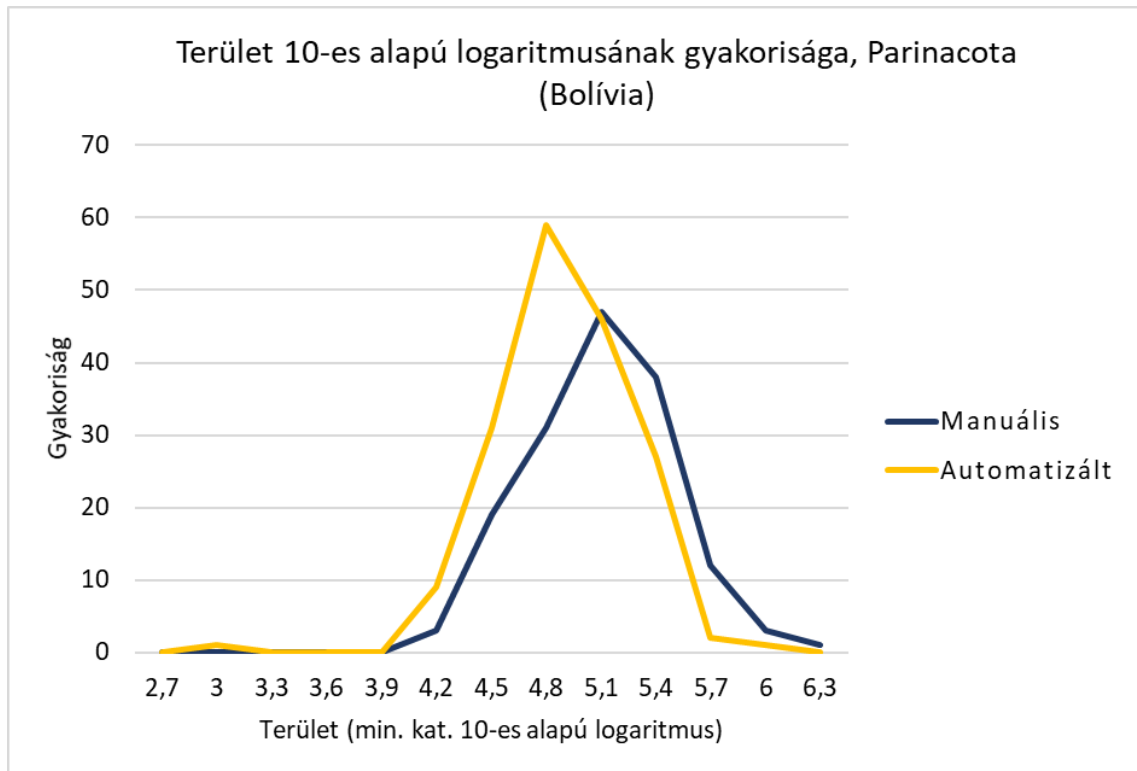
	<b>Dombok száma</b>	<b>Átlagos rel. magasság (m)</b>	<b>Átlagos terület (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Átlagos kerület (m)</b>	<b>Legmagasabb domb (m)</b>	<b>Legnagyobb területű domb (m<sup>2</sup>)</b>
<b>Manuális</b>	154	49	135030	1311	361	1232490
<b>Automatizált</b>	171	27	80743	1113	191	726523

3. táblázat: *A manuális és automatizált lehatárolás során keletkezett dombok főbb paramétereit, Parinacota (Bolívia)*

A 24. ábrán a törmeléklavina dombok területének a 10-es alapú logaritmusát láthatjuk. A diagram is alátámasztja az előbbi megfigyelést, mely szerint az automatizált módszerrel lehatárolt dombok területe valamivel kisebb. Az ok, amint feljebb írtam, hogy a nagyobb kiterjedésű, manuálisan lehatárolt dombokat az automatikus lehatárolás általában több kisebb dombnak észlelte. Továbbá látható, hogy kisebb területű dombok igazából egyik módszer végrehajtása során sem keletkeztek. A törmeléklavina dombok



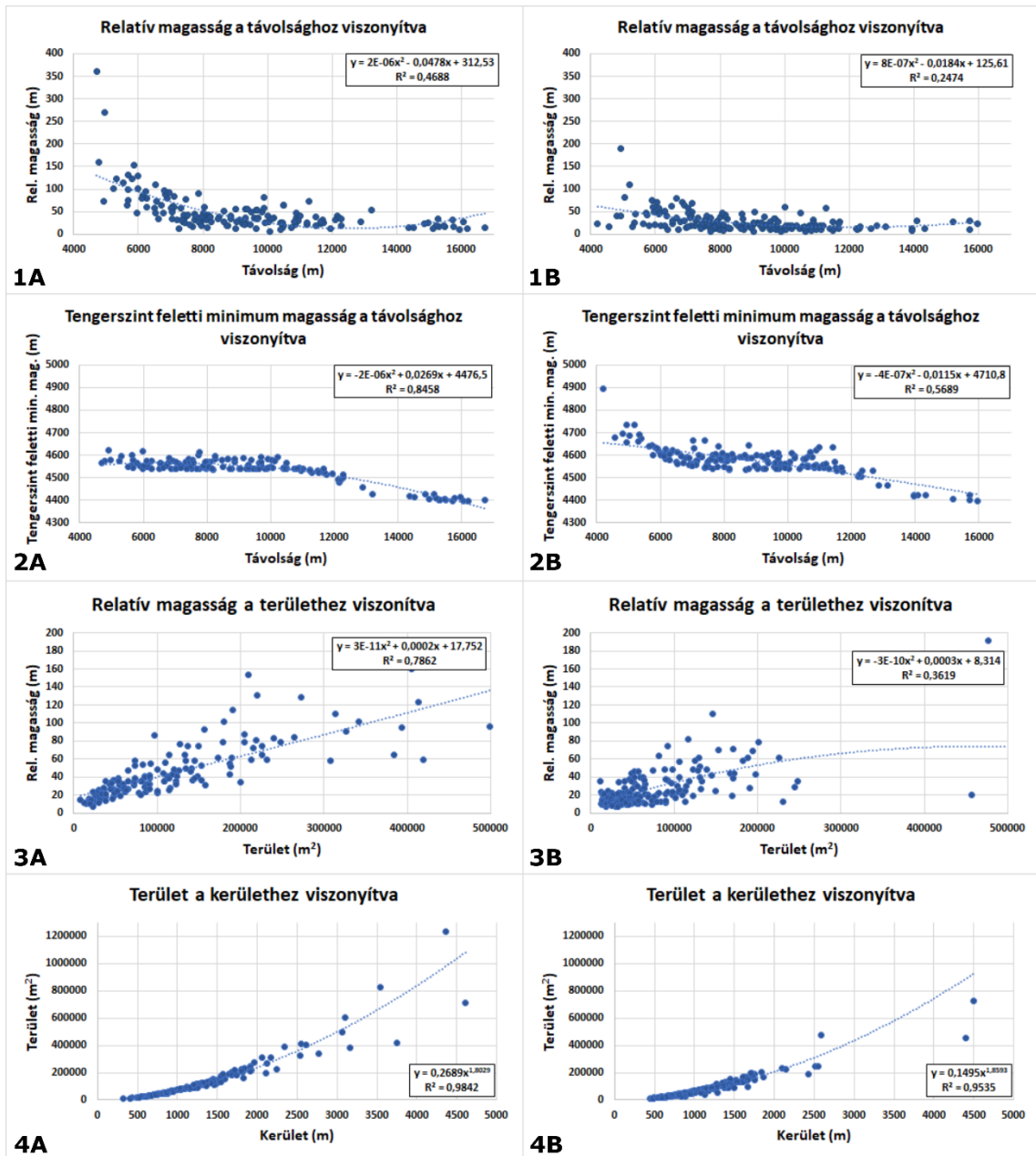
területének eloszlása logaritmikus skálán már jobban közelíti a normál eloszlást, mint az Iriga esetén.



24. ábra: A manuálisan és automatizáltan lehatárolt dombok területe 10-es alapú logaritmusának gyakorisági eloszlása a Parinacota (Bolívia) esetén

A 25. ábrán a törmeléklavina dombok különböző paramétereinek az egymással vett kapcsolatát láthatjuk. Az első sorban a relatív magasság és a távolság viszonyát vizsgáltam. Míg a manuális módszer esetén (1A) a kapcsolat közepesnek tekinthető, addig az automatizált esetén (1B) gyengének. Ennek ellenére elmondható, hogy nagy általánosságban a dombok relatív magasság a vulkántól való távolsággal csökken.

A második sorban a tengerszint feletti minimum magasság és a távolság kapcsolatát láthatjuk (2A, 2B). A manuális és automatizált módszer esetén is megfelelő a kapcsolat erőssége ahhoz, hogy kijelenthessük, hogy a tengerszint feletti minimum magasság csökken a távolsággal. A diagramon jól kivehető, hogy a törmeléklavina egyre mélyebb



25. ábra: A manuális és automatizált lehatárolás során készült dombok mérőszámainak kapcsolata. A: manuálisan lehatárolt dombok, B: automatizáltan lehatárolt dombok

térszíneken rakódott le, ráadásul 13 km-es távolság után (a Parinacota várostól északnyugatra eső részen) a dombok „hirtelen” még mélyebb részen (a Lauca folyó medencéjében) rakódtak le.

A harmadik sorban a relatív magasság és a terület kapcsolatát vizsgáltam. A manuális módszer során lehatárolt dombok (3A) szorosabb korrelációt mutatnak, mint az

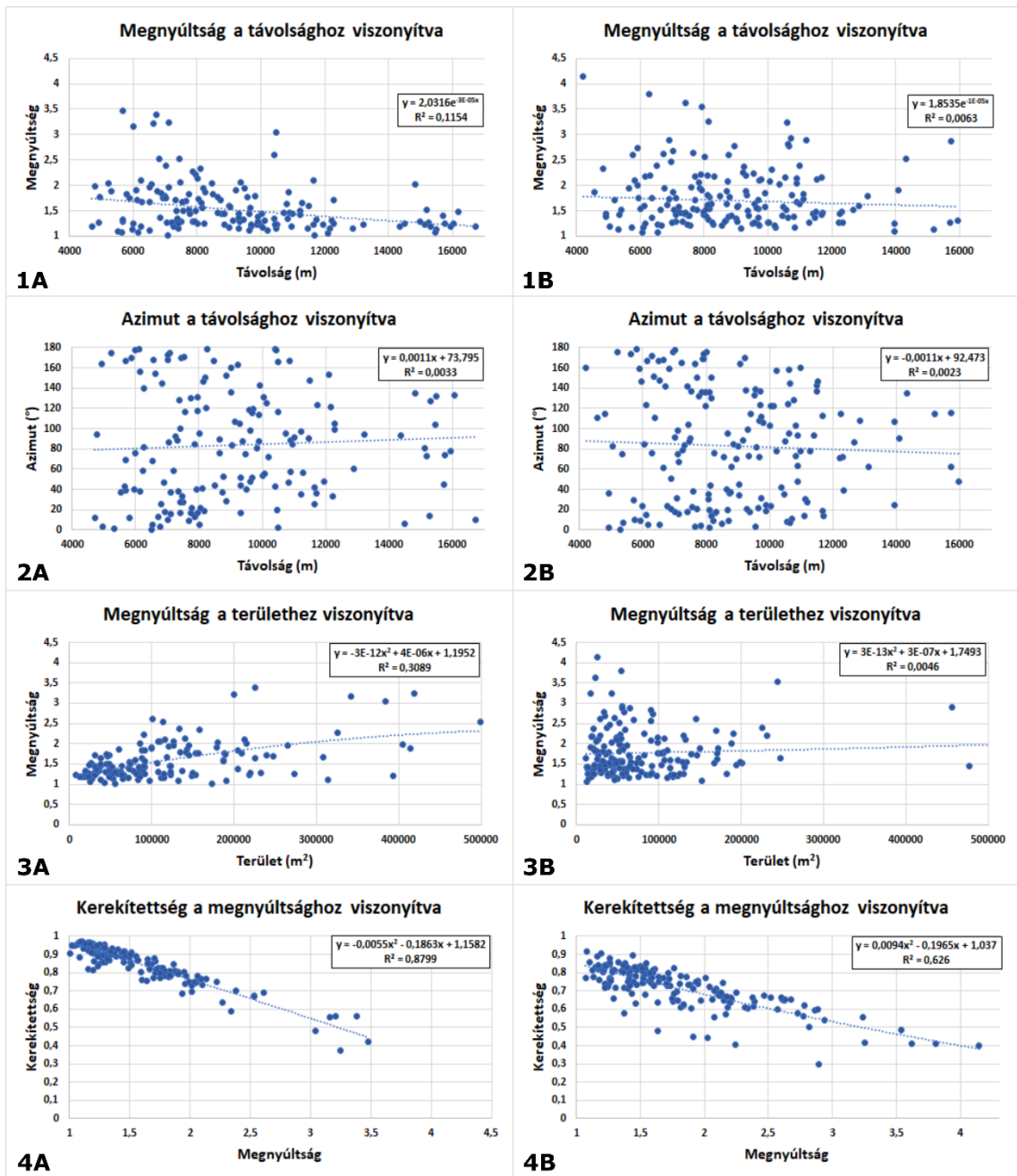
automatizált módszerrel lehatárolt dombok (3B). Ez is annak köszönhető, hogy az automatizált módszer esetén kisebb területű dombok keletkeztek. Tehát elmondható, hogy a relatív magasság összefüggésben van a területtel, ugyanis ha a relatív magasság nő, akkor nő a terület is.

A negyedik sorban a terület és a kerület kapcsolatát láthatjuk. A két paraméter összefüggése itt is nagyon szoros, mindkét módszer esetén. Tehát elmondható, hogy egy domb kerülete szorosan összefügg a területével, vagyis az alakzatok többé-kevésbé hasonlóak egymással.

A 26. ábrán a törmelékklavina dombok alakjával és irányultságával kapcsolatos ábrákat láthatjuk. Az első sorban a megnyúltság és a távolság kapcsolatát vizsgáltam (1A, 1B). E között a két paraméter között nincs mérhető kapcsolat a Parinacota esetén sem. A második sorban az azimut és a távolság kapcsolatát (2A, 2B) láthatjuk, ahol szintén nem mutatható ki érdemi kapcsolat.

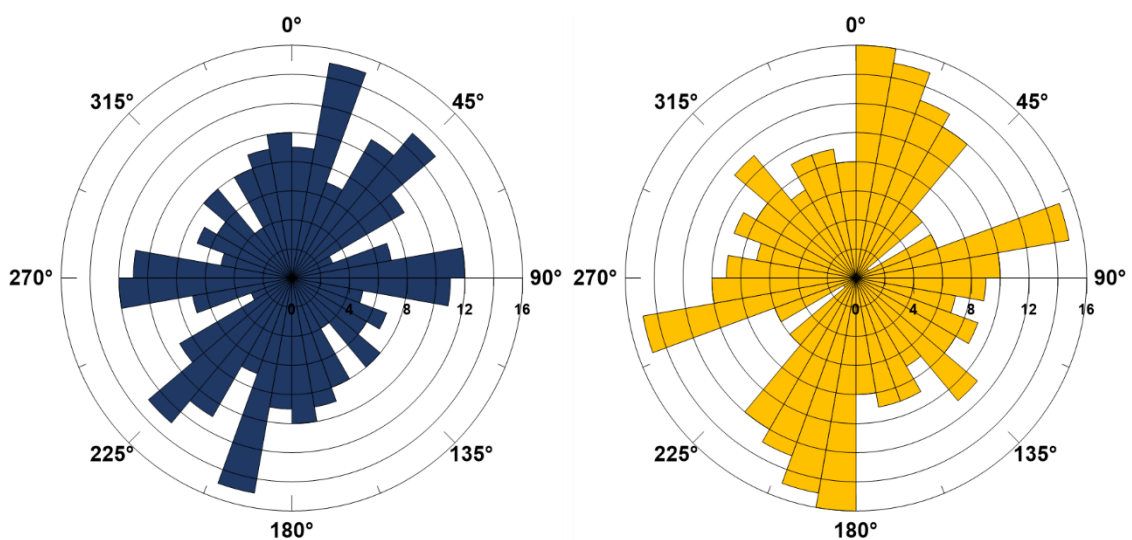
A harmadik sorban azonban már érdekesebbek a diagramok. Ugyanis a manuális módszerrel lehatárolt dombok (3A) esetén kimutatható egy gyenge kapcsolat a megnyúltság és a terület között, tehát a nagyobb területű dombok megnyúltsága nagyobb. Azonban ez a korreláció nem mutatható ki az automatizált módszerrel lehatárolt dombok (3B) esetén. A negyedik sorban a kerekítettség és megnyúltság viszonya látható (4A, 4B). A kapcsolat erőssége a manuális módszer esetén itt is nagyobb. Az automatizált módszer esetén szintén közepes az erősség, tehát kijelenthető, hogy minél szabálytalanabb egy domb, annál hosszúkásabb is.

A különböző paraméterek kapcsolatainak erőssége szinte minden esetben (kivéve a kerület/terület kapcsolatát) nagyobb volt a manuális módszer által lehatárolt dombok (A) esetén, ami annak köszönhető, hogy az ember öntudatlanul is a „szebb”, szabályosabb forma-lehatárolására törekszik, ami szorosabb korrelációkat eredményez.



26. ábra: A manuális és automatizált lehatárolás során készült dombok mérőszámainak kapcsolata. A: manuálisan lehatárolt dombok, B: automatizáltan lehatárolt dombok

A 27. ábrán a törmeléklavina dombok hossz tengelyének irányultsága látható. A diagramról jól leolvasható, hogy a manuális (kék színnel) és automatizált módszer (sárga színnel) esetén a dombok hossz tengelye egyaránt közel észak-déli irányt mutat. Továbbá az is megfigyelhető, hogy egy megközelítőleg nyugat-keleti irány mentén is van egy kicsit magasabb gyakorisági kiugrás. Ez pedig megfelel a szakirodalomban leírtaknak, ugyanis megállapították, hogy a vulkánhoz közel eső területeken a dombok hossz tengelye észak-déli irányt vett fel, míg a törmeléklavina szélein az áramlási iránnyal párhuzamosan álltak be a blokkok, ami megfelel a nyugat-keleti iránynak.



27. ábra: A manuálisan (bal) és automatizáltan (jobb) lehatárolt dombok hossz tengelyének irányultsága. 0° északnak felel meg

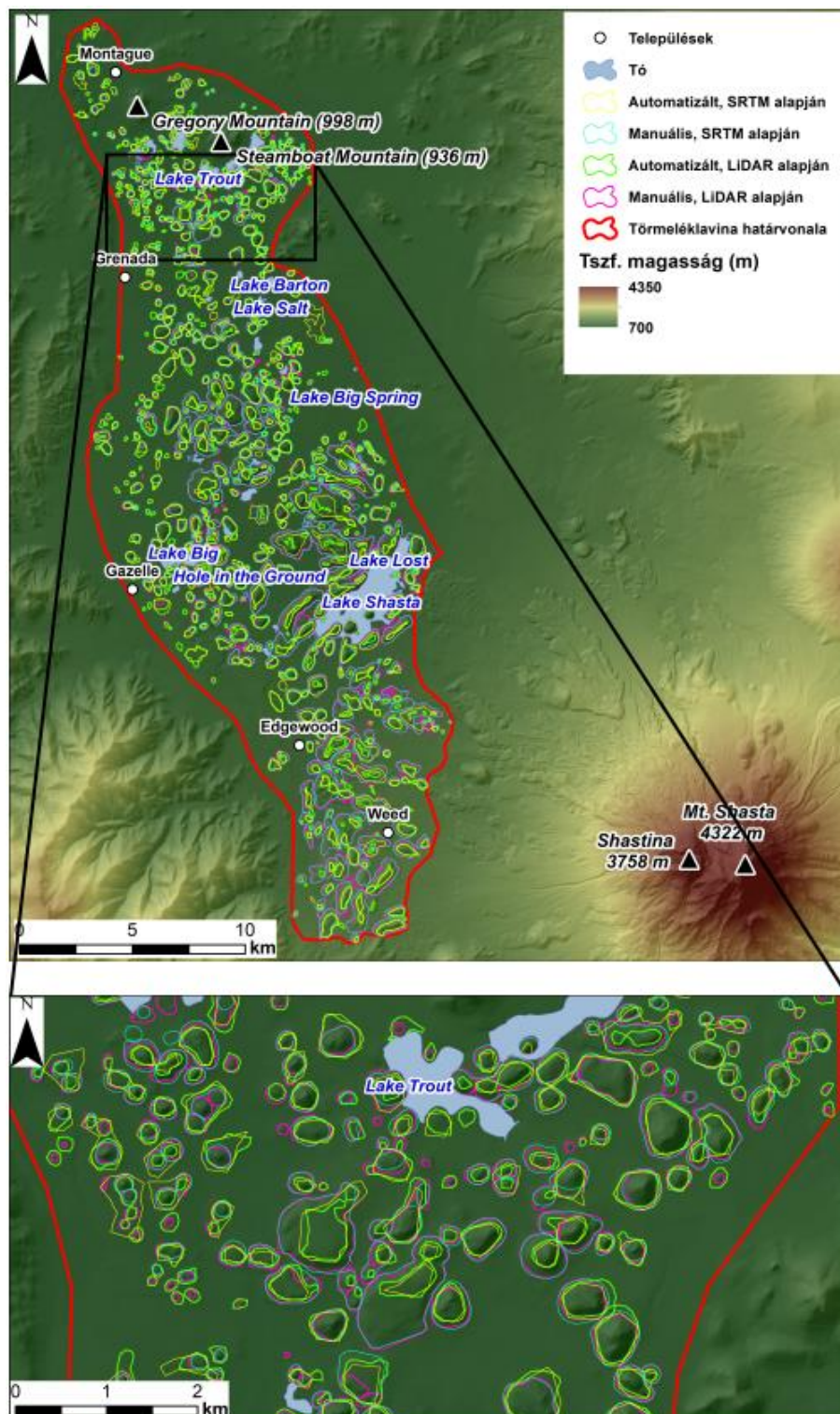
### V.3 Mt. Shasta

Az általam vizsgált vulkáni törmeléklavinák közül a Mt. Shasta (USA) vulkánon kialakult forma volt a legnagyobb minden paramétert figyelembe véve. Nem meglepő, hiszen ez a legnagyobb ismert negyedidőszaki törmeléklavina a Földön. Elemzésem során a CRANDELL, D. et al. (1984) által meghatározott törmeléklavina határvonallal dolgoztam. Ezen a területen csak kis mértékben kellett a törmeléklavina széleit módosítanom, mivel a domborzatmodellen a teljes terjedelme szembetűnő. Az előző területektől eltérően a Mt. Shasta esetén LiDAR és SRTM domborzatmodell is a rendelkezésemre állt.

Az alábbi térképen (28. ábra) jól látható, hogy méreteiben mennyire eltér az előzőekben bemutatott törmeléklavináktól. A lavina a Mt. Shasta északkeleti oldaláról zúdult le. A Parinacotához hasonlóan itt sem látható a jellegzetes patkó alakú kaldera. Míg az előző vulkánok lábánál több *toreva blokk* is látható volt a domborzaton, addig ezen a területen egy ilyet sem látunk. Úgy gondolom, hogy itt is keletkeztek ilyen felszínformák, azonban az azóta lejátszódó vulkáni folyamatok (vulkán északkeleti oldalán látható lávafolyások, Shastina), ezeket eltüntették. A térképen a már megszokott módon ábrázoltam a manuális és automatizált módszerekkel lehatárolt törmeléklavina dombokat, emellett pedig a LiDAR domborzatmodell alapján elkészült dombokat is feltüntettem. Az északon látható két hegy (Gregory Mountain, Steamboat Mountain) a törmeléklavina határvonalán belül helyezkedik el, viszont nem a lavina lerakódása során keletkeztek, hanem később (CRANDELL, D. et al., 1984), ezért azok nem tartoznak bele a dombok vizsgálatába.

A térképen is jól látható, hogy több száz halom, domb és gerinc keletkezett a lavina során, amiket nagyobb sík területek vesznek körbe. A törmeléklavina a Shasta-völgybe zúdult le, aminek nagy a szélessége, és csak a völgyet körülvevő hegyek korlátozták a törmeléklavinát. Ennek következtében az oldalirányú kiterjedése a vulkántól távolodva nem mutat nagyobb változást, a középső régió talán valamivel szélesebb. A térképen a törmeléklavina dombok sűrűségét elnézve nem látunk nagyobb változást, azonban a területük csökkenése a vulkántól távolodva megfigyelhető. Továbbá a dombok hossz tengelyének irányultsága sem mutat szembevető jellegzetességeket.

A kisebb térképi kivágatban a LiDAR és SRTM alapján lehatárolt törmeléklavina dombok különbségét szemléltetem. Megfigyelhető, hogy az SRTM domborzatmodellen lehatárolt nagyobb dombok a LiDAR-on jobban elkülönülnek és több kisebb dombként jelennek meg. Ez várható volt, ugyanis a LiDAR-nak jobb a felbontása, ezért pontosabbak a felszínformák is. Ezen okból az SRTM domborzatmodellen a legapróbb dombokat már nem is lehetett lehatárolni, pedig ezek a LiDAR alapú térképen láthatók.



28. ábra: Az SRTM és LiDAR alapján készült, manuálisan és automatizáltan lehatárolt törmelékklavina dombok a Mt. Shasta (USA) területén

Ezen felül a manuális és automatizált módszer során lehatárolt dombok között is vannak különbségek. A Parinacotához hasonlóan itt is felmerül az a probléma, hogy az automatizált módszer a nagyobb területű dombokat, több kisebb dombra osztotta,

valamint a manuálisan lehatárolt dombok területe jóval nagyobb. Továbbá e módszer során a látszólag sík területeken is megjelentek dombok. A manuális módszer során itt is „szebb” formákat sikerült elérni.

A z alábbi táblázatban a vulkáni törmeléklavina főbb paramétereit láthatjuk, mind az SRTM, mind a LiDAR domborzatmodell alapján. Láthatjuk, hogy a SRTM DEM alapján elkészült vizsgálat során szinte minden paraméter magasabb értéket mutat. Azonban a darabszámban a LiDAR többet mutat és a különbségek nagyon szembetűnők, a manuális módszer esetén közel 200-zal, az automatizált esetben 300-zal több domb lett lehatárolva. Az átlagos terület nagyobb értéke annak köszönhető, hogy a LiDAR domborzatmodell alapján sok apró domb volt lehatárolható, ami lejjebb húzza az átlagot. A magasságértékek különbsége a manuális és az automatizált módszer között itt is abból fakad, hogy az utóbbi módszer kvázi „nem ér le” a dombok lábáig, ezért kisebb is lesz a relatív magasságuk. E miatt az ok miatt térnek el oly nagymértékben a területi adatok is.

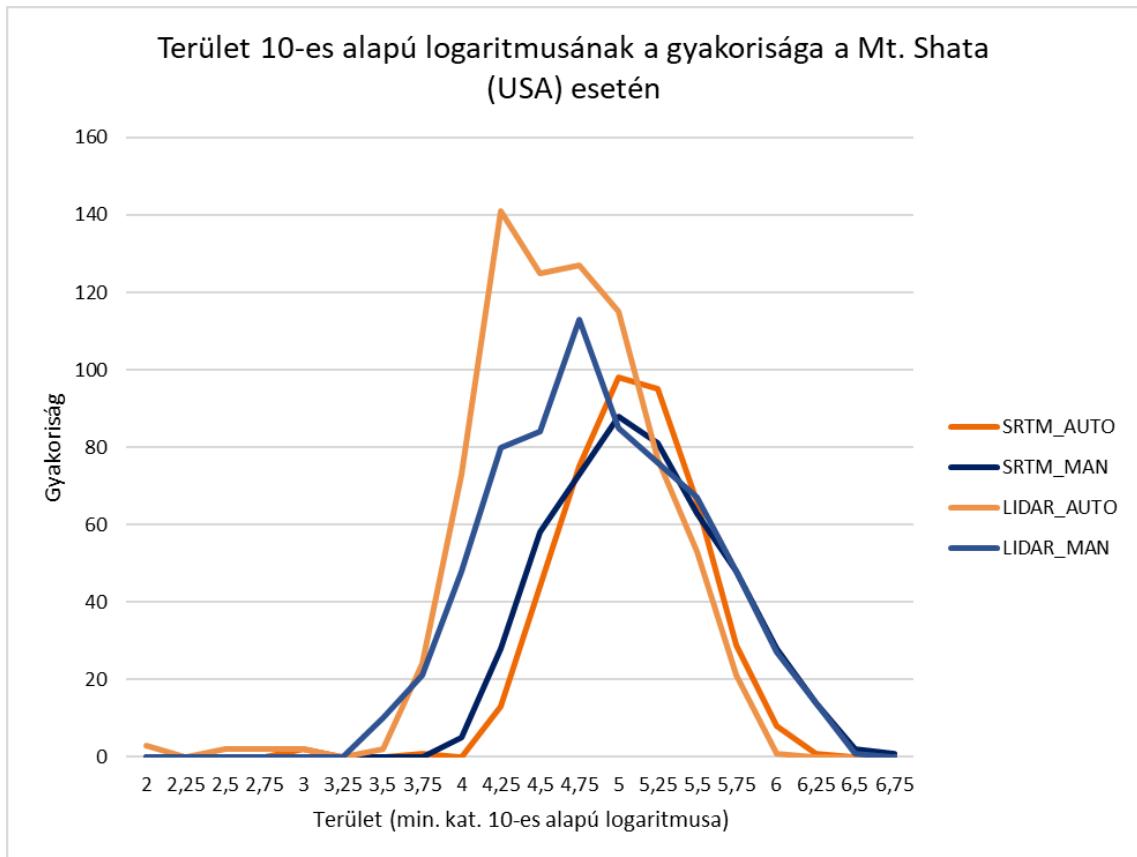
	Dombok száma	Átlagos rel. magasság (m)	Átlagos terület (m <sup>2</sup> )	Átlagos kerület (m)	Legmagasabb domb (m)	Legnagyobb területű domb (m <sup>2</sup> )
<b>Manuális, SRTM alapján</b>	489	47	208308	1519	191	3283180
<b>Automatizált, SRTM alapján</b>	432	31	137436	1380	138	1003760
<b>Manuális, LiDAR alapján</b>	674	42	151911	1241	203	3154850
<b>Automatizált, LiDAR alapján</b>	768	23	66799	906	142	580691

4. táblázat: *Az SRTM és LiDAR alapján elkészült manuálisan és automatizáltan lehatárolt törmeléklavina dombok főbb paramétereit*

Az alábbi diagramon (29. ábra) a négyféleképpen lehatárolt dombok területei 10-es alapú logaritmusának különbségeit láthatjuk. A diagramon megfigyelhető, hogy a LiDAR értékei balkéz felé eltolódnak az SRTM-hez képest, ami már az előzőekben is taglalt ok miatt lehetséges, miszerint a LiDAR domborzatmodellen sok apró domb is lehatárolható volt. Továbbá azt az állítást is alátámasztja a diagram, hogy a manuális



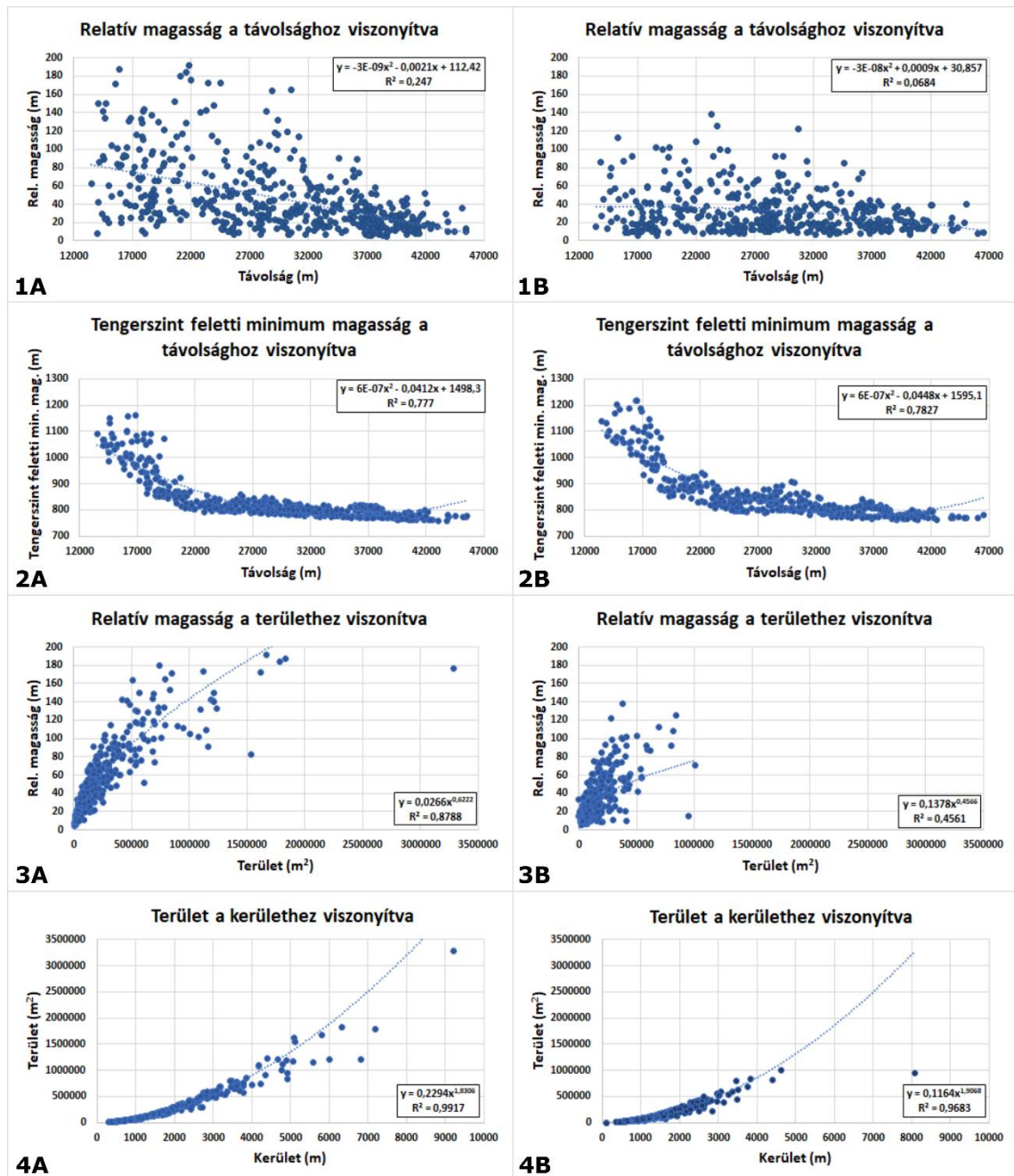
lehatárolás során a dombok területe nagyobb, mint az automatizált módszerrel lehatárolt dombok területe. A gyakorisági eloszlás logaritmikuskála esetén jó közelítéssel normál eloszlást mutat, a Parinacotához hasonlóan.



29. ábra Az SRTM és LiDAR alapján készült, manuálisan és automatizáltan lehatárolt törmelékklavina dombok területe 10-es alapú logaritmusának gyakorisági eloszlása a Mt. Shasta (USA) esetén

A 30. ábrán a manuálisan és automatizáltan lehatárolt dombok főbb paramétereinek kapcsolatát láthatjuk SRTM domborzatmodell alapján. Megfigyelhető, hogy az ábrán szereplő paraméterek kapcsolatának erőssége szinte minden esetben nagyobb a manuálisan lehatárolt dombok esetében. Az első sorban a relatív magasság és a távolság korrelációját vizsgáltam. Míg a manuális módszer esetén (1A) mérhető némi kapcsolat, addig az automatizáltnál (1B) nem. A manuális módszer esetén némi magasság csökkenés észrevehető, ahogy távolodunk a vulkántól.

A második sorban a tengerszint feletti magasság és távolság viszonyát láthatjuk. Az előző vulkánokhoz hasonlóan itt is szépen kijön a törmeléklavina domborzata. Ezen mérőszámok kapcsolatánál az automatizált módszerrel lehatárolt dombok (2B) esetén kis mértékben szorosabb a kapcsolat, mint a manuálisan lehatárolt dombokat tekintve (2A).



30. ábra: A manuális és automatizált lehatárolás során készült dombok mérőszámainak kapcsolata, SRTM alapján. A: manuálisan lehatárolt dombok, B: automatizáltan lehatárolt dombok

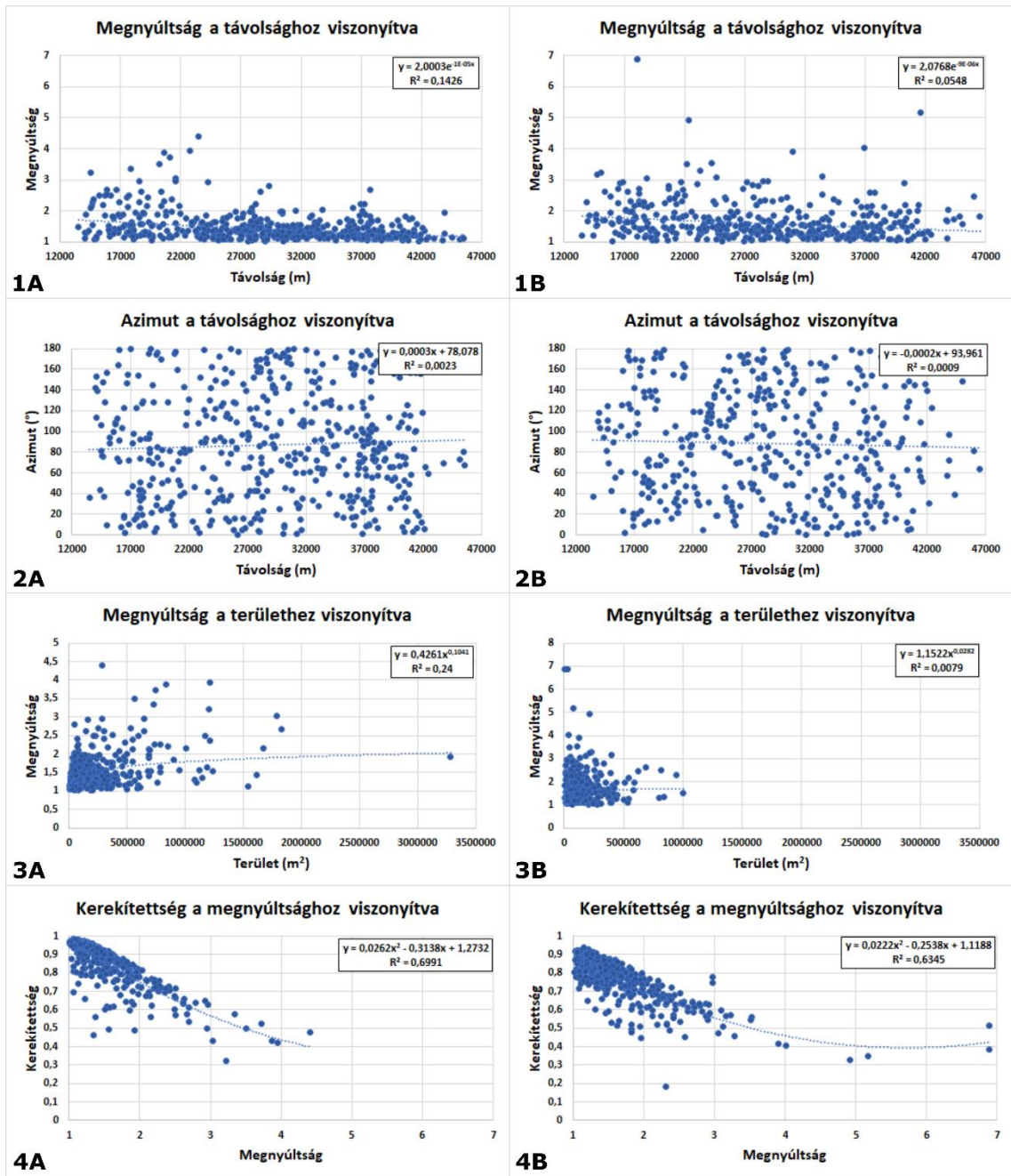
A harmadik sorban a relatív magasság és a terület kapcsolatát vizsgáltam. A kapcsolat a manuális módszer esetén erősnek, míg az automatizált módszer esetén közepesnek tekinthető. Tehát elmondható, hogy a relatív magasság növekedésével, növekedik a terület is. Látható, hogy van egy kiugró területi érték a manuálisan lehatárolt dombok esetén (3A), ami az automatizált módszer (3B) során nem észlelhető. Ennek oka, hogy a manuális módszer során le tudtam határolni ezt a dombot (legnagyobb terület), amit az automatizált módszerrel nem sikerült, mivel több kisebb dombként határolta le az algoritmus, és ezeknek a domboknak a magassága is értelemszerűen kisebb lett

A negyedik sorban a terület és a kerület viszonyát láthatjuk (4A, 4B). A Mt. Shasta esetén is mindkét módszer dombjai erős korrelációt mutatnak. Tehát itt is érvényes az, hogy ha egy domb területe nagyobb, akkor a kerülete is hosszabb lesz.

A 31. ábrán szintén a manuálisan és az automatizáltan lehatárolt dombok főbb paramétereit láthatjuk, ahol a dombok alakjára és irányára van fektetve a hangsúly. Hasonlóan az előző ábrához itt is az SRTM domborzatmodellen vizsgált dombokat elemeztem. Az első sorban a megnyúltság és a távolság viszonyát láthatjuk (1A, 1B). A kapcsolat egyik módszer esetén se mérhető, tehát nem tudunk semmilyen tézist megállapítani.

A második sorban az azimut és távolság korrelációját (2A, 2B), a harmadik sorban a megnyúltság és terület kapcsolatát (3A, 3B) láthatjuk. Megfigyelhető, hogy egyik módszer esetén sincs különösebb kapcsolat. A megnyúltság és a terület között a manuális módszer során némi korreláció mérhető. Tehát a terület növekedésével gyenge kapcsolatban nő a megnyúltság is.

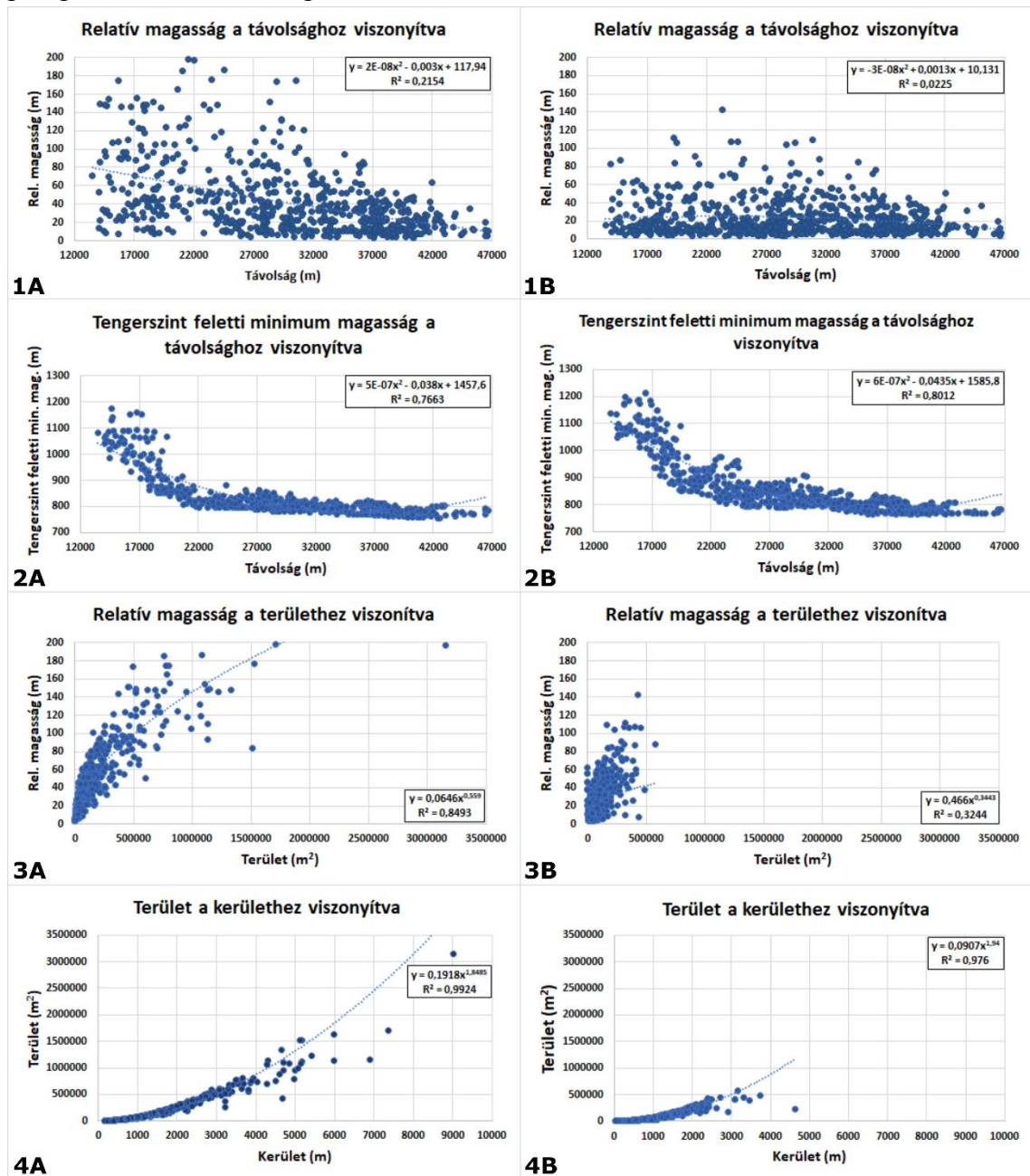
A negyedik sorban a kerekítettség és megnyúltság kapcsolatát láthatjuk (4A, 4B). Hasonlóan az eddigiekhez itt is magas a korreláció a két mérőszám között. Tehát ha a kerekítettség növekszik, vele növekszik a megnyúltság is.



31. ábra: A manuális és automatizált lehatárolás során készült dombok mérőszámainak kapcsolata, SRTM alapján. A: manuálisan lehatárolt dombok, B: automatizáltan lehatárolt dombok

A 32. ábrán szintén a manuálisan és automatizáltan lehatárolt dombok főbb paramétereinek a kapcsolatát láthatjuk, azonban már a LiDAR alapú domborzatmodellel végzet vizsgálat alapján. Az SRTM-hez hasonlóan itt is szinte minden paraméter esetén

a manuális módszer nagyobb értéket produkált (egy kivételével). Az első sorban a relatív magasság és távolság kapcsolatát láthatjuk. A manuális módszer (1A) során itt is nagyobb korreláció mérhető, azonban még ez is elég gyenge. Az automatizált módszer (1B) esetén pedig nincs is mérhető kapcsolat.



32. ábra: A manuális és automatizált lehatárolás során készült dombok mérőszámainak kapcsolata, LiDAR alapján. A: manuálisan lehatárolt dombok, B: automatizáltan lehatárolt dombok

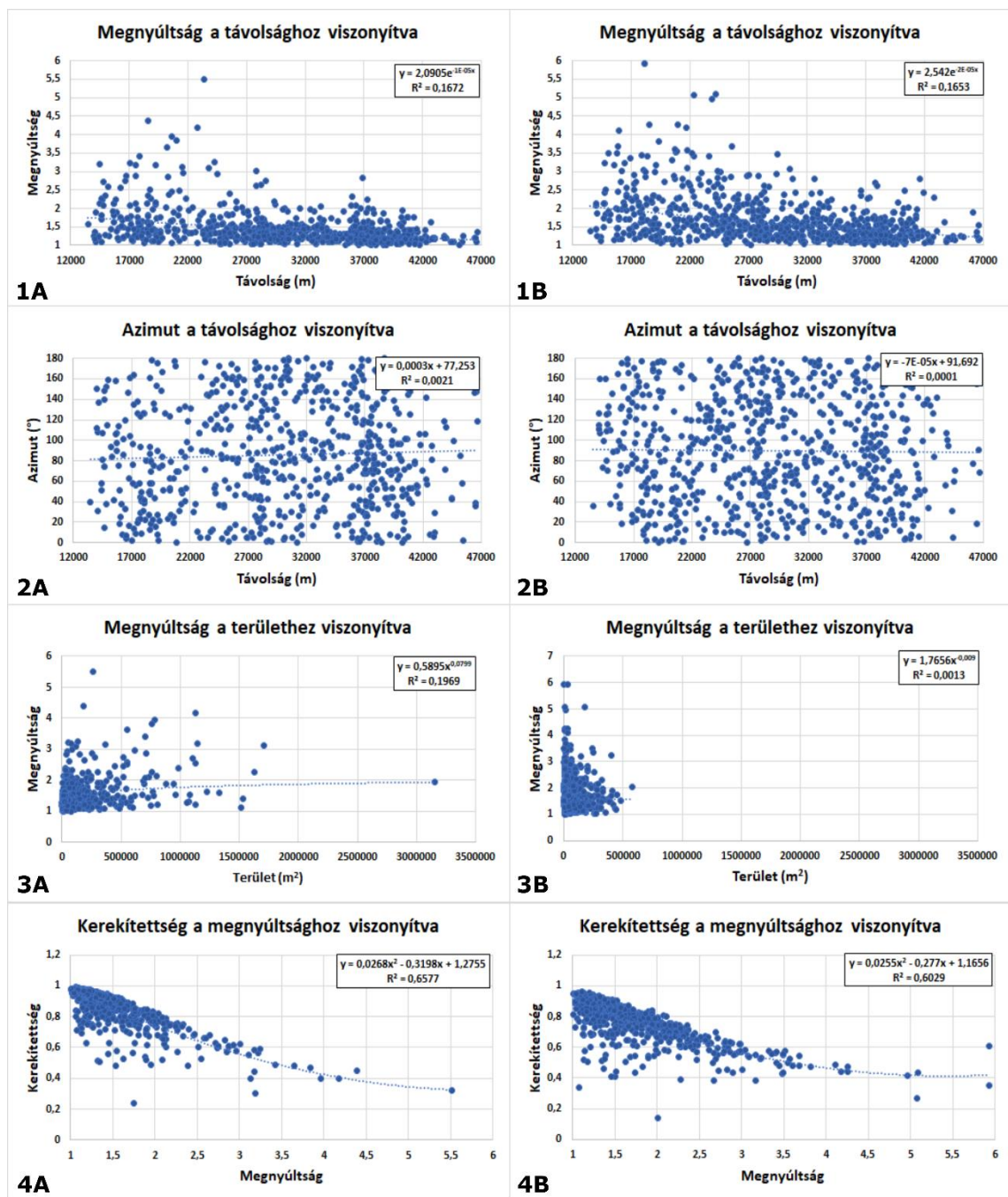
A második sorban a tengerszint feletti magasság és távolság viszonyát láthatjuk (2A, 2B). Ebben az esetben is az automatizált módszer során nagyobb korreláció alakult ki a két paraméter között. Továbbá a LiDAR alapján is szépen kijött a törmeléklavina domborzata.

A harmadik sorban a relatív magasság és terület korrelációját vizsgáltam (3A, 3B). Mindkét módszer során szoros a kapcsolat erőssége, tehát itt is elmondható, hogy a távolság növekedésével csökken a tengerszint feletti minimum magasság. A kiugró területi érték itt is megjelenik. A negyedik sorban pedig a terület és kerület kapcsolatát láthatjuk (4A, 4B). Itt is ennek a két paraméternek a legerősebb a kapcsolata, tehát ha nő a terület, nő a kerület is.

A 33. ábrán a megszokott módon a manuálisan és az automatizáltan lehatárolt dombok főbb paramétereit láthatjuk, ahol a dombok alakjára és irányára van fektetve a hangsúly, LiDAR alapján. Az első sorban a megnyúltság és távolság viszonyát láthatjuk (1A, 1B). Egyik módszer esetén se éri el az  $R^2$  érték a 0,2-t, tehát nem tudunk semmilyen tézist megállapítani. A második sorban is hasonló a helyzet. Az azimut és a távolság kapcsolatáról (2A, 2B) sem tudunk megállapítani törvényszerűséget.

A harmadik sorban a megnyúltság és terület viszonyát vizsgáltam. A manuálisan lehatárolt dombok esetén (3A)  $R^2$  majdnem eléri a 0,2-es értéket, azonban nem elég ahhoz, hogy egyértelmű megállapítást tegyünk. Az automatizáltan lehatárolt domboknál (3B) abszolút nem mutatható ki semmilyen kapcsolat. A negyedik sorban a kerekítettség és megnyúltság korrelációját láthatjuk (4A, 4B). Mindkét módszer esetén közepesnek tekinthető a kapcsolat erőssége, tehát kijelenthető, hogy a kerekítettség növekedésével, a megnyúltság is növekedni fog.

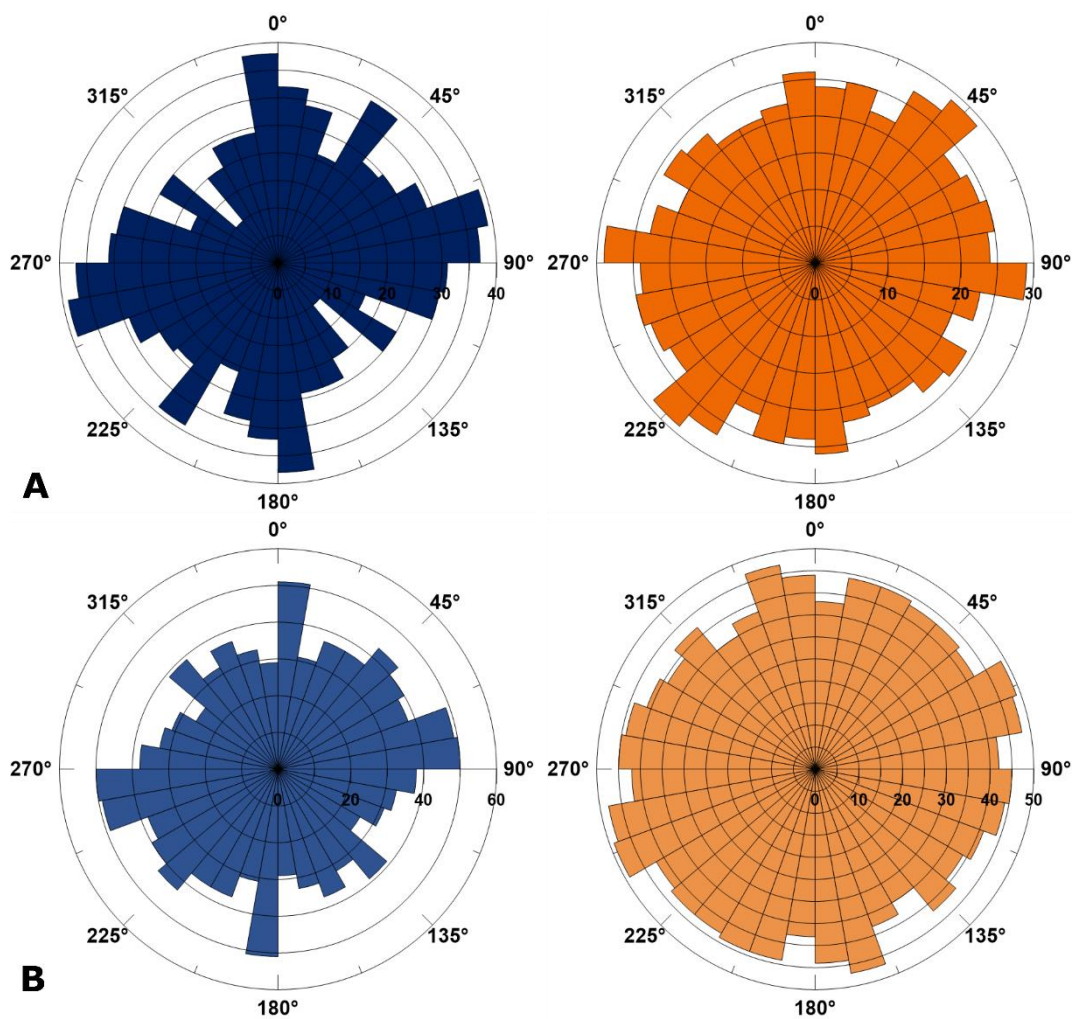
Összeségében elmondható, hogy a paraméterek kapcsolatát nem sokban befolyásolta, hogy a levezetést SRTM vagy LiDAR domborzatmodell alapján végeztük. Ugyanis, ha összevetjük a diagramokat láthatjuk, hogy nagyon kis mértékben térnek el egymástól. Hol az SRTM alapján nagyobb egy érték, hol a LiDAR alapján. Ebből adódóan nem állíthatjuk, hogy a LiDAR jelentős minőségi javulást eredményez ezekben a morfológiai mutatókban.



33. ábra: A manuális és automatizált lehatárolás során készült dombok mérőszámainak kapcsolata, LiDAR alapján. A: manuálisan lehatárolt dombok, B: automatizáltan lehatárolt dombok

A 34. ábrán a törmelékklavina dombok hossztengeyének irányultsága látható, az A sorban az SRTM, a B sorban a LiDAR domborzatmodell alapján. A manuális módszer során lehatárolt dombokról (kék színek) némi irányultság elmondható. Látható, hogy a

nyugat-keleti tengely mentén a dombok gyakorisága kiemelkedik, mind az SRTM, mind a LiDAR alapján. Az automatizált módszer során lehatárolt dombokról (sárga színek) ez már nem mondható el. A diagramon megfigyelhető, hogy e dombok esetén nincs olyan főbb irány, ahol nagyobb gyakoriságot mutatnának a dombok hossz tengelyei. Összességében tehát az állapítható meg, hogy a dombok tengely szerinti elrendeződése véletlenszerű képet mutat.



34. ábra: A manuálisan (bal) és automatizáltan (jobb) lehatárolt dombok hossz tengelyének irányultsága. A: SRTM alapján, B: LiDAR alapján. 0° északnak felel meg

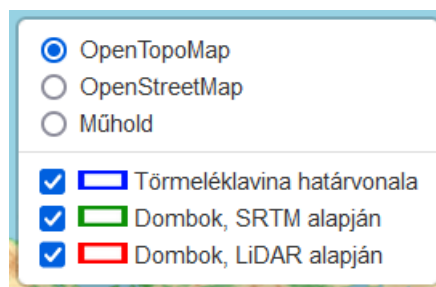


#### ***V.4 Weblap bemutatása***

A weboldalamat a [www.mercator.elte.hu/~k3dr8/diploma/vol\\_deb\\_ava.html](http://www.mercator.elte.hu/~k3dr8/diploma/vol_deb_ava.html) címen lehet elérni és ajánlott a Mozilla Firefox böngészőben megnyitni, ugyanis más böngészőben kissé eltérő formázás mutat, mint amit beállítottam.

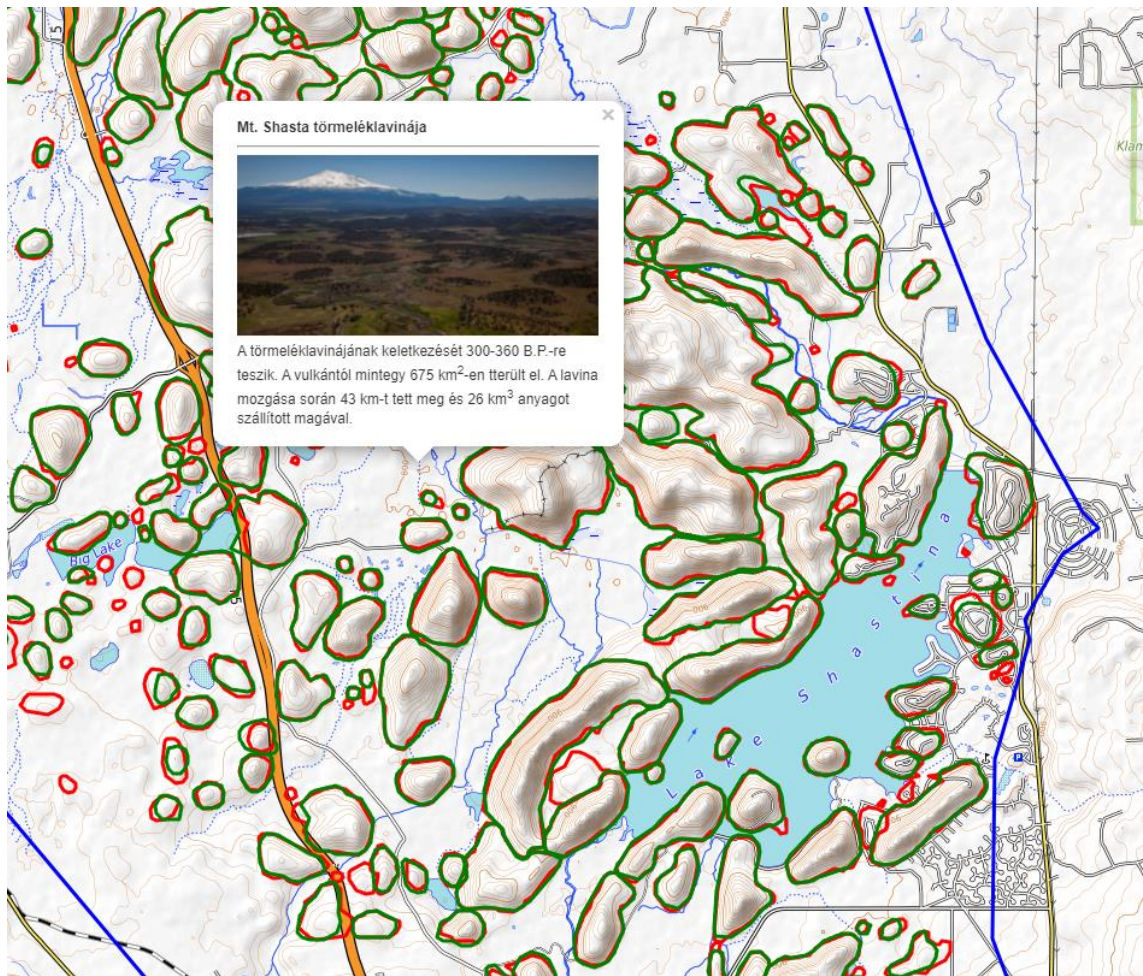
A weboldal lényegében egy webtérképet tartalmaz, ahol megjelenítettem az általam elkészített vektoros (törmeléklavina határvonal, dombok körvonala) állományokat, annak érdekében, hogy a felhasználó közelebbről is meg tudja nézni őket.

A térkép jobb oldalán található egy rétegkezelő felület (35. ábra), ahol ki- és bekapcsolni tudjuk a különböző vektoros rétegeket. Ez leginkább a Mt. Shastánál használható, mivel ott a LiDAR és SRTM domborzatmodellen lehatárolt dombokat is megjelennek. Továbbá a felhasználó kedvére választhat a különböző térképi rétegek közül. A térképen még látható egy mértékléc, valamint a bal felső sarokban egy +/- gomb, amivel a nagyítás mértékét lehet állítani. Ha a törmeléklavinákra kattintunk egy kis ablak felugrik, amiben egy képet láthatunk az adott vulkánról, továbbá egy rövid leírást azokról (36. ábra).

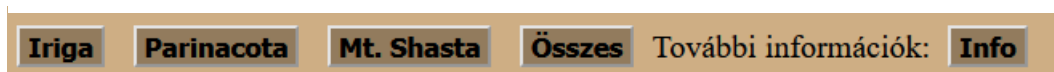


35. ábra: A webtérkép rétegkezelőjének rétegei

A weboldal bal felső sarkában található a már említett gombok (37. ábra), amik segítségével a felhasználó egy kattintás alatt a kiválasztott területre nagyíthat, keresgélés nélkül. Az utolsó gomb megnyomásával pedig egy másik weboldalra tudunk átlépni, ahol hosszabb leírást olvashatunk a vizsgált területekről, valamint lehetőség van az általam elkészített diagramok, illetve a jelen tanulmány letöltésére.



36. ábra: A webtérképre behívott rétegek megjelenése, valamint a törmeléklavina határvonalának megkattintására felugró ablak, Mt. Shasta területén



37. ábra: A weboldalon található gombok

## VI. Diskusszió

Az első vizsgált területem az Iriga vulkán (Fülöp-szigetek) volt. Annak ellenére, hogy a törmeléklavinájának kialakulása nem közvetlenül vulkáni eredetű, a vulkáni törmeléklavinák közé sorolják. Ebből adódóan nem lehet más vulkáni törmeléklavina kialakulásával összehasonlítani. A domborzatmodellen a jellegzetes lópatkó alakú kaldera, valamint a vulkán lábánál lerakódott *toreva blokk* is szépen kivehető volt. A szakirodalom két törmeléklavina üledékét is elkülönítette (PAGUICAN, E. M. R. et al., 2012), azonban a domborzatmodellen csak a vulkántól keletre eső területeken lerakódott törmeléklavina dombjai látszottak, ezért csak ezt a részt tudtam vizsgálni. A domborzatmodell alapján valamivel kisebb területet sikerült lehatárolni, mint a szakirodalomban jelölt törmeléklavina. Ugyanis a szakirodalom 70 km<sup>2</sup>-t ír, a vizsgálatom során pedig ~ 52 km<sup>2</sup>-nyi területet sikerült elkülönítenem. A legtávolabbi dombok a vulkántól körülbelül 10 km-re találhatók, a manuális és automatizált módszer alapján egyaránt.

A törmeléklavina kiterjedését „gomba alak” jellemezte, ami az általam alkalmazott törmeléklavina határvonala alapján is kivehető volt. Tehát ez is alátámasztja a szakirodalomban leírtakat, miszerint a törmeléklavina mozgása során oldalirányban szétterjedt az anyag. Tanulmányomban a tengerszint feletti minimum és a távolság vizsgálata során nagyon szépen kivehető volt az automatizált módszer alapján készült diagramon, hogy a törmeléklavina disztális része feltorlódott a Mt. Malinao vulkán lábára.

Továbbá kiderült, hogy a relatív magasság és a távolság összefügg, ugyanis a relatív magasság csökken a vulkántól való távolsággal. A térképről pedig jól leolvasható volt, hogy a törmeléklavina dombok területe is csökken a vulkántól való távolsággal és a törmeléklavina középső területén vannak legnagyobb sűrűségben a dombok. Mindemellett a tengerszint feletti magasságuk is csökken a távolsággal.

A törmeléklavina dombok hossz tengelyének irányultságánál a manuálisan lehatárolt dombok esetén más eredmény jött ki, mint a szakirodalomban. Ugyanis a legtöbb domb az északkelet-délnyugat tengely mentén helyezkedett el, ami merőleges a mozgási iránnyal. Ezzel szemben a szakirodalom azt állítja, hogy a mozgási iránnyal

párhuzamosan, azaz egy északnyugat-délkelet tengely mentén rakódtak le. Az automatizált módszer során lehatárolt dombok hossz tengelye egyrészt ezt mutatta. Másrészt pedig északkelet-délnyugat tengellyel megegyező dombok is előfordultak.

A második vizsgált vulkánom a Parinacota volt. A vulkáni törmeléklavina kialakulását a képlékeny, üledékes (Lauca-folyó) aljzatra épült vulkáni kúp terhelése okozta. Ehhez hasonlóan alakult ki a Socompa vulkánon létrejövő törmeléklavina is. A Parinacota esetén a mai domborzatmodellrel már nem látható a jellegzetes patkó alakú kaldera. Ezen vulkán esetén is változtatni kellett a törmeléklavina határvonalon, aszerint hogy hol látszanak dombok a felszínen. Ennek következtében a szakirodalomban említett 140-150 km<sup>2</sup>-es területű törmeléklavina területéből csak ~ 89 km<sup>2</sup>-t vizsgáltam. Ennek megfelelően a kifutási távolságnak is kisebb értéket lehetett meghatározni a domborzatmodellről, ugyanis a 20-22 km helyett, ~ 16 km körül fekszenek a legtávolabbi, domborzatmodellrel is azonosítható dombok.

A térképen megfigyelhető volt a törmeléklavina keletkezésekor felvett felülnézetben ék alak, mivel a vulkán lábánál az üledék még szélesen elterül és attól távolodva fokozatosan beszűkül, ahogy a Lauca-folyó medencéjébe érkezik. A szakirodalom említi, hogy a Parinacota törmeléklavinájának az üledéke nem tartalmazza a mátrix fáciest. Ezt értelemszerűen csak terepi munkával lehet meghatározni, azonban a domborzatmodellrel is jól látszott, hogy a nagy dombok szorosan egymáshoz közel települtek le. Továbbá jól láthatók voltak a vulkán lábánál a *toreva blokkok* is, amik az alsó egység részét képezik. A *holtjég-lyukakban* kialakult tavak észrevehetőek voltak a felszínen.

Az Irigáéhoz hasonlóan itt is szépen kirajzolódott a domborzat a tengerszint feletti minimum és távolság diagramokon, mind a manuális, mind az automatizált módszer során. A relatív magasság és távolság diagramról pedig leolvasható volt, hogy a törmeléklavina dombok relatív magassága csökken a távolsággal.

Vizsgálatom során a törmeléklavina dombok hossz tengelyének az irányultsága megegyezett a szakirodalomban leírtakkal. Ugyanis a manuális és az automatizált módszer során lehatárolt dombok is két tengely mentén mutattak nagyobb gyakoriságot. Az egyik az észak-déli irány volt, ami a vulkán lábánál lévő *toreva blokkokra* volt

jellemző, ami a mozgási irányra merőleges volt. A másik tengely pedig a nyugat-keleti volt, ami a törmeléklavina szélein volt jellemző és a mozgási iránnyal párhuzamos.

A Mt. Shasta (USA) volt a harmadik és egyben utolsó általam vizsgált vulkáni törmeléklavina. A törmeléklavina kiváltó oka még nem tisztázott a tudósok körében, azonban úgy gondolják, hogy mindenképp vulkáni eredetűnek kell lennie a méreteit (megtett távolság, terület, térfogat) elnézve. Az általános részben felsorolt kiváltó okok között lehet a magma benyomulás, robbanásos tevékenység, földrengés vagy akár e folyamatok összesége is okozhatta a Mt. Shasta törmeléklavinájának kialakulását.

A vizsgálatom során használt törmeléklavina határvonal  $\sim 379 \text{ km}^2$  területet fedett be, ami a szakirodalomban leírt területnek majdnem fele. A legtávolabb található dombok, mind a LiDAR, mind az SRTM domborzatmodellen,  $\sim 46 \text{ km-re}$  találhatóak. Ez az érték valamivel nagyobb, mint a szakirodalomban meghatározott érték. A Paríncotához hasonlóan a Mt. Shastánál se található meg a jellegzetes patkó alakú kaldera, valamint a térképén látható volt, hogy a kiterjedésének nincsen jellegzetes alakja. Viszonylag azonos szélességű a vulkántól távolodva, ami a Shasta-völgy formájának köszönhető. Az előző vulkánoktól eltérően a Mt. Shasta lábánál nem találhatóak toreva blokkok, amit feltételezhetően az azóta lezajló vulkáni tevékenység temetett el.

A törmeléklavina dombok relatív magassága itt csak kis mértékben függ a távolságtól. Az előzőkhöz hasonlóan a tengerszint feletti magasság és a távolság diagramja szépen kirajzolták, hogy milyen domborzaton ülepedett le a törmeléklavina. A térképen is jól látható, hogy a dombok sűrűsége különösebben nem változik a vulkántól való távolsággal.

A szakirodalom különösebb említést nem tett a törmeléklavina dombok hossz tengelyének irányultságáról. A vizsgálatom során fény derült ennek okára, ugyanis az automatizált módszer során lehatárolt dombok semmilyen főbb irányt nem jelöltek ki, míg a manuális módszerrel lehatárolt dombok irányultságán némi nyugat-keleti irányultságot mutatnak.

A vizsgálatom során kiderült, hogy az automatizált módszer során lehatárolt dombok átlagos magassága mindhárom terület esetén kisebb lett, mint a manuális

módszer során lehatárolt domboké. Úgy gondolom, hogy a TELBISZ T. (2021) által alkalmazott hierarchikus megközelítés egyes dombok esetén megoldaná ezt a problémát. Tehát a későbbiekben érdemes lenne e módszert tovább véve vizsgálni a törmeléklavina dombokat. Továbbá úgy gondolom, hogy az általam használt vizsgálati módszerek jó előkészítései lehetnek a terepi munkáknak, ugyanis a távérzékelte lehatárolás után célzottan meg lehet keresni az egyes dombokat.

A kutatás egy másik logikus folytatási iránya, hogy a meglévő módszerekkel több vulkáni törmeléklavinát is meg lehetne még vizsgálni, hogy így az összefüggéseknek komolyabb statisztikai alapja legyen.

## **VII. Következtetések**

Összeségében elmondható, hogy az automatizált módszer egyedüli alkalmazása nem jó a törmeléklavina dombok lehatárolására, ugyanis szabálytalanabb dombok keletkeznek és a méret-paraméterek értékei is kisebbek lesznek, mint manuális lehatárolás esetén, márpedig a manuális lehatárolás jobban közelíti a valóságot. Ennek ellenére az automatikus eljárás jó kiegészítése lehet a manuális módszernek, ugyanis főleg a Parinacota esetén, ahol szorosan egymás mellett rakódtak le a dombok nehéz volt azokat meghatározni, viszont az automatizált módszer eredménye a segítségemre volt további dombok manuális lehatárolásában.

A vizsgálatom egyik célja az volt, hogy a manuális és az automatizált módszert összehasonlítsam. Az automatizált módszer során lehatárolt dombok az Iriga kivételével minden esetben kisebb relatív magassági és területi értéket értek el. Ez annak köszönhető, hogy e módszernek nem sikerült teljesen a dombok lábáig „leérni”, továbbá szabálytalanabb dombok is keletkeztek általa. Az Iriga vulkánnál – meglepő módon – az automatizált módszer esetén átlagosan nagyobb területű dombok keletkeztek, valamint a relatív magassági értékek is csak kis mértékben tértek el.

A másik célkitűzése a tanulmánynak az volt, hogy a domborzatmodellek felbontása és az eredmények közti kapcsolatot megvizsgálja. A vizsgálatom során azonban az derült ki, hogy érdemileg nem javítja a paraméterek kapcsolatát, annak ellenére, hogy számos kis dombot is sikerült a LiDAR domborzatmodellen lehatárolni. Ebből adódóan némileg

jobban megfelel a valóságnak a 10 m-es felbontású domborzatmodell alapján lehatárolt törmeléklavina dombok elhelyezkedése, de a statisztikai mérőszámokat ez érdemileg nem javítja.

Az általam készített weboldal jól bemutatja, hogy a manuális lehatárolás során milyen dombok keletkeztek. A felhasználó közelebbről is megnézheti a dombokat különböző térképeken, ami valósabb élményt nyújt, mint a domborzatmodell. Továbbá hosszabb leírást is olvashatnak a vizsgált törmeléklavinákról, letölthetik az általam használt diagramokat és a diplomamunkámat is.

## VII. Összefoglalás

A Mount St. Helens 1980-as kitöréséig a vulkáni törmeléklavinákat még nem ismerték annyira a tudósok, és nem is tudtak semmi pontosat a kialakulásukról. Napjainkban már jól ismert folyamat ez, és keletkezésüket 5 főbb folyamattal magyarázhatjuk. Keletkezhetnek új magma benyomulásával, hidrotermális nyomás hatására, földrengésekkel, vulkáni terjeszkedéssel és akár a klímaváltozás hatására is. A törmeléklavinák mozgására különféle modelleket dolgoztak ki a kutatók. Azonban minden modell azon a tézisen alapszik, hogy a lezúduló anyag valaminek a hatására (levegő, víz, finom szemcsés por) „fluid” állapotba kerül, ezzel megkönnyítve a törmeléklavina mozgását.

A vulkáni törmeléklavinák kialakulása során jellegzetes alakú bemélyedések keletkeznek a kitörési központban. Azonban, mint láttuk előfordulhat, hogy ezeket a felszínformákat a folyamatos vulkáni aktivitás eltünteti. A törmeléklavinák során létrejött üledéket dombos felszín jellemzi, amelynek kiemelkedései nagyon változatosak lehetnek. Az üledéket két fácies jellemzi a *törmeléklavina blokkok* és a *törmeléklavina mátrix*. A törmeléklavina blokkok elsődleges textúrája és geológiai szerkezete a vulkáni anyagból származik. A mátrix fácies anyaga a törmeléklavinatömbök ütközésével és feldarabolódásával jön létre. Összetétele sokkal változatosabb, mint a blokkoké, ugyanis a lavina mozgása során felvehet üledékeket, a talajrétegek anyagát és az aljzati kőzeteket is.

A vizsgálatom során kétféle domborzatmodellel dolgoztam. Egyrészt *SRTM* (Shuttle Radar Topography Mission) 1"-es adatokkal, aminek 30 m-es a felbontása. Másrészt *LiDAR* (Light Detection And Ranging) alapú domborzatmodellel, aminek 10 m-es a felbontása. A további munkálatokhoz az ArcGIS ArcMap szoftverében megtalálható különféle eszközök voltak a segítségemre. A letöltött adatokon különböző előkészítő eljárásokat kellett végrehajtanom, ezután két „Model Builder”-ben összeállított modellel dolgoztam.

Az Iriga törmeléklavinájának vizsgálata során a domborzatmodellen jól kivehetők voltak a vulkáni törmeléklavinákra jellemző felszínformák, mint a patkó alakú kaldera és a toreva blokk. A domborzatmodell alapján 20 km<sup>2</sup>-rel kisebb területet sikerült lehatárolni



a törmeléklavinának, és a legtávolabbi dombok 10 km-es távolságban figyelhetők meg. Jelen tanulmányból kiderült, hogy a dombok relatív magassága és területe csökken a vulkántól való távolsággal. A dombok hossz tengelyének irányultsága a manuális módszer esetén nem egyezett meg a szakirodalomban leírtakkal, azonban az automatizált módszer szerint igen, vagyis azt tapasztaltam, hogy az mozgási iránnyal párhuzamos, északnyugat-délkeleti irányú a blokkok jelentős része.

A Parinacota vizsgálata során a domborzatmodellen nem volt látható a patkó alakú kaldera, viszont a *toreva blokkok* már igen, továbbá megfigyelhetők voltak a *holtjéglyukakban* kialakult tavak. A Parinacota esetén is valamivel kisebb területet sikerült lehatárolnom a domborzatmodellről. A tanulmányomból kiderült, hogy a dombok relatív magasság csökken a vulkántól való távolsággal. Az Irigával ellentétben a Parinacota törmeléklavina dombjainak hossz tengelyének vizsgálata ugyanazt az eredményt hozta, amit a szakirodalom is említ. Tehát a vulkán lábánál az áramlása merőleges dombok találhatóak, míg a lavina szélein párhuzamos dombok telepedtek le.

Az utolsó vizsgált területem a Mt. Shasta (USA) volt. Ezen a területen is kisebb területű törmeléklavinát sikerült lehatárolni, mint amennyi a szakirodalomban szerepel, azonban a legmesszebb lévő dombok távolsága valamivel nagyobb volt a méréseim szerint, mint ahogy azt a szakirodalom írja. Itt se található meg a jellegzetes lópatkó alakú kaldera, továbbá a *toreva blokkok* sem. A törmeléklavina dombok relatív magassága itt kisebb mértékben függött a távolsággal. A szakirodalom különösebb említést nem tett a dombok hossz tengelyének irányultságáról. A vizsgálatom során kiderült, hogy ez nem véletlen, ugyanis az automatizált módszer során lehatárolt dombok azimutja nem jelöl ki semmilyen főbb irányultságot. A manuális módszer dombjai némi nyugat-keleti irányultságot mutattak, de ez sem volt különösebben markáns. A Mt. Shasta esetén lehetőségem volt két domborzatmodellen is vizsgálni a törmeléklavinát. Azonban az eredményekből arra következtettem, hogy a jobb felbontású domborzatmodell nem befolyásolja érdemlegesen a vizsgálat paraméterek kapcsolatát.

## VIII. Summary

Until the eruption of Mount St Helens in 1980, volcanic debris avalanches were not well understood by scientists, and nothing was known about their formation. Nowadays, this process is well understood and their formation can be explained by 5 main processes. They can be created by the intrusion of new magma, hydrothermal pressure, earthquakes, volcanic expansion and even climate change. Researchers have developed various models for the movement of debris avalanches, but all are based on the thesis that the material being deposited is influenced by something (air, water, fine-grained dust) to become a "fluid", thus facilitating the movement of the debris avalanche.

During the formation of volcanic debris avalanches, characteristic shaped depressions are formed in the eruption centre. However, as we have seen, it is possible that these landforms are eroded away by ongoing volcanic activity. The sediment generated during debris avalanches is characterised by a hilly surface with a wide variety. The sediment is characterised by two facies, the debris avalanche blocks and the debris avalanche matrix. The primary texture and geological structure of the debris avalanche blocks is derived from volcanic material. The facies material of the matrix is formed by the collision and fragmentation of the debris lava blocks. Its composition is much more diverse than that of the blocks, as it can incorporate sediments, bedrock and bedrock during avalanche movement.

In my study, I worked with two different terrain models. On one hand, SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 1" data with a resolution of 30 m. On the other hand, a LiDAR (Light Detection And Ranging) based topography model with a resolution of 10 m. For further work I was assisted by various tools available in ArcGIS ArcMap software. I had to perform various preparatory procedures on the downloaded data, then I worked with two models created in the "Model Builder".

When examining the Iriga debris avalanche, the elevation model clearly showed the surface features typical of volcanic debris avalanches, such as the horseshoe-shaped caldera and the torevá block. The topography model delineated a 20 km<sup>2</sup> area of the debris avalanche, with the most distant hills being observed at a distance of 10 km. From the present study, it was found that the relative height and area of the hills decrease with

distance from the volcano. The orientation of the longitudinal axis of the hills in the manual method did not agree with the literature, but in the automated method it did, i.e. I found that a significant part of the blocks are oriented in a northwest-southeast direction parallel to the direction of motion.

In the study of Parinacota, the horseshoe-shaped caldera was not visible in the elevation model, but the toreva blocks were, and the lakes formed in the dead-ice holes were visible. I was also able to delineate a slightly smaller area of Parinacota from the elevation model. My study showed that the relative height of the hills decreases with distance from the volcano. In contrast to Iriga, the longitudinal axis of the hills of the Parinacota debris avalanche yielded the same results as reported in the literature. Thus, at the foot of the volcano, there are hills perpendicular to the flow, while parallel hills are found at the edges of the avalanche.

My last study area is Mt. Shasta (USA). In this area, too, I was able to delineate a debris avalanche with a smaller area than reported in the literature, but the distance between the furthest hills was slightly greater than the literature indicates. The characteristic of a horseshoe-shaped caldera is not found here, nor are the toreva blocks. The relative height of the debris avalanche mounds here was less related to distance. No specific mention is made in the literature of the orientation of the longitudinal axis of the hills. My investigation revealed that this is not accidental, as the azimuth of the hills delineated by the automated method does not indicate any major orientation. The hills in the manual method showed some west-east orientation, but this was not particularly pronounced. The Mt. Shasta, I had the opportunity to examine the debris avalanche on two hill models. However, I concluded from the results that the higher resolution elevation model did not significantly affect the relationship between the study parameters.

## **IX. Köszönetnyilvánítás**

Ezúton is szeretném megköszönni a sok segítséget és ötletet a konzulensemnek, Dr. Telbisz Tamásnak. A weboldalam létrehozásában pedig Dr. Gede Mátyásnak. Köszönettel tartozom édesanyámnak és párjának ugyanis egyetemi pályafutásom soha nem valósulhatott volna meg segítségük és támogatásuk nélkül. Végző soron pedig szeretném megköszönni barátaimnak, akikre mindig számíthattam bármilyen problémával is fordultam hozzájuk.

## **Irodalomjegyzék**

- AGUILA, L., NEWHALL, C., MILLER, C., LISTANCO, E. 1986: Reconnaissance geology of a large debris avalanche from Iriga volcano. Philippines. *Philippine J Volcanol* 3.
- AURELIO, M. 2000: Tectonics of the Philippines revisited. *Journal of the Geological Society of the Philippines* 55, 119–183.
- BELOUSOVA, M. – LISTANCO, E. 2011: The youngest eruptions and edifice collapse of Iriga volcano, Philippines. IUGG General Assembly (conference)
- VAN BEMMELEN, R.W. 1949: The geology of Indonesia. Govt. Printing Office, The Hague.
- CAMPBELL, M.R. 1915: Guidebook of the Western United States: Part A - The Northern Pacific Route, With a Side Trip to Yellowstone Park (USGS Numbered Series No. 611), Guidebook of the Western United States: Part A - The Northern Pacific Route, With a Side Trip to Yellowstone Park, Bulletin. U.S. Geological Survey.
- CAPRA, L. 2006: Abrupt climatic changes as triggering mechanisms of massive volcanic collapses. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 155, 329–333.
- CHRISTIANSEN, R. L. 1982: Volcanic hazard potential in the California Cascades. Martin, R. C. & Davis, J. F. (Eds.) , Special Publication , 63, p. 41-59.
- CLAVERO, J., SPARKS, R.S.J., HUPPERT, H., WB, D. 2002: Geological constraints on the emplacement mechanism of the Parinacota debris avalanche, Northern Chile. *Bulletin of Volcanology* 64, 40–54.
- CLAVERO R., J.E., SPARKS, S.J., POLANCO, E., PRINGLE, M.S. 2004: Evolution of Parinacota volcano, Central Andes, Northern Chile. *Revista geológica de Chile* 31, 317–347.
- CRANDELL, D., MILLER, C., GLICKEN, H., CHRISTIANSEN, R., NEWHALL, C. 1984: Catastrophic debris avalanche from ancestral Mount Shasta volcano, California. *Geology* 12.

- CRANDELL, D.R. 1989: Gigantic debris avalanche of Pleistocene age from ancestral Mount Shasta Volcano, California, and debris-avalanche hazard zonation (No. 1861), Bulletin. U.S. G.P.O. ; For sale by the Books and Open-File Reports Section.
- ESCHER, B.G. 1925: L'éboulement préhistorique de Tasikmalaja et le volcan Galounggoung (Java). Leidse Geologische Mededelingen 1, 8–21.
- FENNER, C.N. 1923: The Origin and Mode of Emplacement of the Great Tuff Deposit of the Valley of Ten Thousand Smokes. Geophysical Laboratory, Carnegie Institution of Washington.
- FRANCIS, P.W. – WELLS, G.L. 1988: Landsat Thematic Mapper observations of debris avalanche deposits in the Central Andes. Bull Volcanol 50, 258–278.
- GLICKEN, H. 1996: Rockslide-Debris Avalanche of May 18, 1980, Mount St. Helens Volcano, Washington: Usgs Open-File Report 96-677. BiblioGov.
- GODOY, B., RODRÍGUEZ, I., PIZARRO, M., RIVERA, G. 2017: Geomorphology, lithofacies, and block characteristics to determine the origin, and mobility, of a debris avalanche deposit at Apacheta-Aguilucho Volcanic Complex (AAVC), northern Chile. Journal of Volcanology and Geothermal Research 347, 136–148.
- HORA, J., SINGER, B., WÖRNER, G. 2007: Volcano evolution and eruptive flux on the thick crust of the Andean Central Volcanic Zone:  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  constraints from Volcán Parinacota, Chile. Geological Society of America Bulletin - GEOL SOC AMER BULL
- JICHA, B.R., LAABS, B.J.C., HORA, J.M., SINGER, B.S., CAFFEE, M.W. 2015: Early Holocene collapse of Volcán Parinacota, central Andes, Chile: Volcanological and paleohydrological consequences. GSA Bulletin 127, 1681–1688.
- KEEFER, D.K. 1984: Rock Avalanches Caused by Earthquakes: Source Characteristics. Science 223, 1288–1290.
- PAGUICAN, E.M., VAN WYK DE VRIES, B., LAGMAY, A.M. 2014: Hummocks: How they form and how they evolve in rockslide-debris avalanches. Landslides 11.

- PAGUICAN, E.M., VAN WYK DE VRIES, B., LAGMAY, A.M. 2012: Volcano-tectonic controls and emplacement kinematics of the Iriga debris avalanches (Philippines). *Bulletin of Volcanology* 74.
- REID, M.E. 2004: Massive collapse of volcano edifices triggered by hydrothermal pressurization. *Geology* 32, 373–376.
- SIEBERT, L. 1984: Large volcanic debris avalanches: Characteristics of source areas, deposits, and associated eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 22, 163–197.
- TELBISZ, T. 2021: Lidar-Based Morphometry of Conical Hills in Temperate Karst Areas in Slovenia. *Remote Sensing* 13, 2668. <https://doi.org/10.3390/rs13142668>
- TELBISZ, T., SZÉKELY, B., TIMÁR, G. 2013: Digitális Terepmodellek (Adat, látvány, elemzés) egyetemi tankönyv.
- UI, T., GLICKEN, H. 1986: Internal structural variations in a debris-avalanche deposit from ancestral Mount Shasta, California, USA. *Bull Volcanol* 48, 189–194.
- Ui, T., Takarada, S., Yoshimoto, M., 2015. Debris Avalanches, in: *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, pp. 617–626.
- VAN WYK DE VRIES, B., SELF, S., FRANCIS, P.W., KESZTHELYI, L. 2001: A gravitational spreading origin for the Socoma debris avalanche. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 105, 225–247.
- VOIGHT, B., FRANCIS, P., NEUBERG, J., SPARKS, R.S.J. 2000. Structural stability of andesite volcanoes and lava domes. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 358, 1663–1703.
- WILLIAMS, H. 1932: Mount Shasta, a Cascade Volcano. *The Journal of Geology* 40, 417–429.

### **Internetes hivatkozások**

[www.apps.nationalmap.gov/viewer](http://www.apps.nationalmap.gov/viewer), Letöltve: 2022.03.16.

[www.earthexplorer.usgs.gov](http://www.earthexplorer.usgs.gov), Letöltve: 2022.03.16.

[www.leafletjs.com](http://www.leafletjs.com), Letöltve: 2022.05.12.

[www.mergili.at/worldimages/picture.php?/8528](http://www.mergili.at/worldimages/picture.php?/8528), Letöltve: 2022.05.03.